

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN DEL CONCRETO ESTIMADA A PARTIR DE LA
UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

MANUEL URIEL ASPILCUETA ASENCIOS

Lima - Perú

2015

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

	Pág.
RESUMEN	6
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS	16
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO I: ANTEPROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.1. ANTECEDENTES	18
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.3. OBJETIVOS	21
1.4. ALCANCES	21
1.5. LIMITACIONES	22
CAPÍTULO II: MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO	23
2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO	23
2.1.1. Naturaleza de la resistencia a la compresión del concreto	24
2.1.2. Ley de Duff Abrams	26
2.2. MÉTODOS ESTANDARIZADOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO	29
2.2.1. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas - ASTM C39 – NTP 339.034	29
2.2.2. Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido - ASTM C 805 - NTP 339.181	31
2.2.2.1. <i>Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión en base al número de rebote</i>	34
2.2.3. Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto - ASTM C 597 - NTP 339.237	35
2.2.3.1. <i>Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión en base a la velocidad de ultrasonido.</i>	41

CAPÍTULO III: MÉTODO DE MADUREZ DEL CONCRETO	43
3.1. CONCEPTO DE MADUREZ DEL CONCRETO	43
3.2. MODELOS PARA DETERMINAR LA MADUREZ DEL CONCRETO	44
3.2.1. Modelo de Nurse - Saúl	44
3.2.2. Modelo de Rastrup	46
3.2.3. Modelo de Arrhenius	47
3.2.4. Modelo holandés	48
3.2.5. Modelo de Guo	51
3.3. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO A PARTIR DEL CONOCIMIENTO DE SU MADUREZ	51
3.3.1. Curva madurez vs. resistencia	51
3.3.2. Modelos para la curva madurez vs. resistencia	52
3.3.2.1. <i>Función exponencial</i>	52
3.3.2.2. <i>Función logarítmica</i>	53
3.3.2.3. <i>Función hiperbólica</i>	53
3.4. NORMATIVA DEL MÉTODO DE MADUREZ DEL CONCRETO – ASTM C 1074	54
3.4.1. Resumen de la normativa del método de madurez	55
3.4.2. Ventajas y limitaciones del método de madurez	55
3.4.2.1. <i>Ventajas de usar la madurez del concreto</i>	55
3.4.2.2. <i>Limitaciones del método de madurez del concreto</i>	56
3.4.2.3. <i>Requisitos de los equipos para medir la madurez del concreto</i>	57
3.4.2.4. <i>Procedimiento para desarrollar la curva madurez - resistencia</i>	57
3.4.2.5. <i>Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión del concreto a partir de su madurez</i>	59
3.4.2.6. <i>Precisión del método de madurez del concreto</i>	61
3.5. EQUIPOS PARA MEDICIÓN DE LA MADUREZ DEL CONCRETO	61
3.5.1. Primera generación de equipos de medición de madurez	62
3.5.1.1. <i>Método manual</i>	62
3.5.1.2. <i>Colector de datos externos</i>	62
3.5.1.3. <i>Mecanismo de cálculo externo de madurez</i>	63
3.5.2. Segunda generación de equipos de medición de madurez	63
3.5.2.1. <i>Colector de datos internos</i>	64

3.5.2.2. <i>Colector de datos internos vía inalámbrica.</i>	64
3.6. PROYECTOS INTERNACIONALES QUE HAYAN APLICADO EL MÉTODO DE MADUREZ	65
3.6.1. Proyecto de construcción comercial en Frisco, Texas	65
3.6.2. Proyecto de intercambio vial "Dallas High Five", Texas	66
3.6.3. Proyecto Marriott Courtyard, Oklahoma.	66
3.6.4. Proyecto de reparación del túnel Chingaza, Bogotá	67
CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN PROBETAS	68
4.1. MATERIALES UTILIZADOS	68
4.1.1. Cemento	68
4.1.2. Agregados	69
4.1.2.1. <i>Análisis granulométrico</i>	70
4.1.2.2. <i>Módulo de fineza</i>	72
4.1.2.3. <i>Absorción</i>	73
4.1.2.4. <i>Humedad</i>	73
4.1.2.5. <i>Peso unitario y contenido de vacíos</i>	73
4.1.2.6. <i>Material que pasa la malla N°200</i>	73
4.1.2.7. <i>Gravedad específica</i>	74
4.1.2.8. <i>Densidad</i>	74
4.1.3. Agua	76
4.1.4. Aditivo	76
4.2. DISEÑO DE MEZCLA	77
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN MUESTRAS CILÍNDRICAS	81
4.4. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO POR EL MÉTODO DE MADUREZ	85
4.4.1. Desarrollo de la curva madurez vs. resistencia	85
4.4.1.1. <i>Resultados para el modelo de Nurse - Saúl</i>	87
4.4.1.2. <i>Resultados para el modelo de Arrhenius o Edad Equivalente.</i>	90

4.4.2. Resultados generados para evaluar la precisión del método de madurez	93
4.4.2.1. <i>Valores obtenidos para el modelo de Nurse - Saúl</i>	94
4.4.2.2. <i>Valores obtenidos para el modelo de Arrhenius</i>	95
4.5. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO	96
4.5.1. Desarrollo de la curva número de rebote vs. resistencia	96
4.5.2. Resultados generados para evaluar la precisión del método de número de rebote	98
4.6. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO	99
4.6.1. Desarrollo de la curva velocidad de pulso vs. resistencia	100
4.6.2. Resultados generados para evaluar la precisión del método de velocidad de pulso	101
CAPÍTULO V: ENSAYOS DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES	103
5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	103
5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ	104
5.2.1 Concreto de 350 kg/cm ² y slump 4" a 6"	105
5.2.2 Ensayos de resistencia a la compresión utilizando el método de probetas cilíndricas y el método de madurez	106
5.2.2.1 <i>Desarrollo de la curva madurez vs resistencia para el diseño de mezcla</i>	106
5.2.2.2 <i>Resultados generados por la implementación del método de madurez</i>	108
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS	112
6.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO	112
6.1.1. Precisión del método de madurez	113
6.1.1.1 <i>Precisión para el modelo de Nurse - Saúl</i>	113
6.1.1.2 <i>Precisión para el modelo de Arrhenius</i>	116
6.1.2. Precisión del método del número de rebote	118
6.1.3. Precisión del método de la velocidad de pulso	120

6.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO	123
6.2.1. Análisis del muro anclado en el proyecto implementado	123
6.2.2. Análisis de las losas postensadas en el proyecto implementado	125
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
7.1. CONCLUSIONES	132
7.2. RECOMENDACIONES	134
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	138

RESUMEN

La presente investigación consiste en realizar un análisis comparativo de la resistencia a la compresión estimada a partir de la utilización del método de madurez. El desarrollo de la resistencia a la compresión en elementos de concreto es una variable fundamental que permite conocer cuando un concreto es lo suficientemente resistente para poder soportar cargas futuras.

Esto se realiza, convencionalmente, por medio del ensayo de probetas cilíndricas o probetas de control utilizando el método estandarizado descrito en la ASTM C 39 - NTP 339.034, "*Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas*", las cuales otorgan resultados que se toman como indicadores de la resistencia a la compresión en los elementos de concreto.

Actualmente se sabe que estos resultados no son iguales a la resistencia que se encuentra en los elementos, de hecho se clasifica en dos tipos de resistencia: resistencia potencial y resistencia real. La resistencia potencial es la otorgada por las probetas de control mientras que la resistencia real es la que se encuentra en el elemento. En las prácticas de construcción es aceptable que la relación resistencia real/ resistencia potencial sea mayor o igual que el 85%, pero cuando este valor no llega a ser alcanzado, se generan ensayos adicionales con el fin de corroborar esta relación.

Por tal razón, en los últimos 20 años se han ido desarrollando nuevas prácticas para poder estimar la resistencia de manera in situ, entre ellas se encuentra el método de madurez descrito en la ASTM C 1074 - NTP 339.217, "*Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez*". Este método es una técnica que utiliza los efectos combinados de temperatura y tiempo para predecir la resistencia a la compresión del concreto. Esta técnica fue desarrollada hace más de 50 años por dos investigadores británicos llamados Nurse y Saúl, y ha sido aplicado en diversos proyectos extranjeros.

Una de las particularidades de los resultados obtenidos por este método fue la optimización del tiempo en actividades constructivas, tales como desencofrado,

tensado, reapuntalado, etc. Entonces cabe preguntarse: ¿Qué posibles resultados podría generar el método de madurez en nuestros proyectos? ¿Serán los mismos?

Al realizar la implementación del método de madurez en un laboratorio, se encontró una fuerte correlación entre las variables madurez y resistencia a la compresión, estadísticamente esto se apreció con una desviación estándar igual a 5.4% y un coeficiente de correlación de 0.977. Mientras que para otros métodos como el número de rebote descrito en la ASTM C 805 – NTP 339.181, "*Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido (esclerometria)*", y la velocidad de pulso descrito en la ASTM C 597 – NTP 339.237, "*Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto*", no se encontraron los mismos resultados.

En la implementación del método de madurez, se encontraron resultados muy similares a los obtenidos en proyectos internacionales, la principal ventaja que se obtuvo fue la optimización del tiempo en algunas actividades constructivas.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1: Valores de "n" correspondiente a los T_k , Betoniek 1984.	49
Tabla 3.2: Ejemplo de madurez ponderada, CUR 1986.	50
Tabla 4.1: Análisis granulométrico para el agregado fino.	70
Tabla 4.2: Análisis granulométrico para el agregado grueso.	71
Tabla 4.3: Resumen de los ensayos realizados en los agregados empleados.	75
Tabla 4.4: Propiedades de los agregados usados en el diseño de mezcla.	77
Tabla 4.5: Relación agua/cemento y % en volúmenes de los agregados.	78
Tabla 4.6: Cantidad de agua en lt/m^3 según el TMN agregados y asentamiento.	78
Tabla 4.7: Diseño de mezcla para un $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ y $a/c, = 0.65$.	80
Tabla 4.8: Proporciones utilizadas en la elaboración de probetas cilíndricas en el LEM.	80
Tabla 4.9: Resultados para la elaboración de curvas patrones de los métodos indirectos.	82
Tabla 4.10: Resultados del método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas.	83
Tabla 4.11: Cálculo de la madurez por el modelo de Nurse - Saúl.	87
Tabla 4.12: Puntos obtenidos para la elaboración de la curva patrón según el modelo de Nurse - Saúl.	88

Tabla 4.13: Cálculo de la madurez por el modelo de Arrhenius.	90
Tabla 4.14: Puntos obtenidos para la elaboración de la curva patrón según el modelo de Arrhenius.	91
Tabla 4.15: Mediciones de resistencia usando el modelo de Nurse - Saúl.	94
Tabla 4.16: Mediciones de la resistencia usando el modelo de Arrhenius.	95
Tabla 4.17: Puntos obtenidos para la curva número de rebote vs. resistencia.	97
Tabla 4.18: Mediciones de la resistencia utilizando el número de rebote.	98
Tabla 4.19: Puntos obtenidos para la curva velocidad de pulso vs. resistencia.	100
Tabla 4.20: Mediciones de la resistencia utilizando la velocidad de pulso.	101
Tabla 5.1: Diseño característico de la mezcla.	105
Tabla 5.2: Características de los insumos de la mezcla.	106
Tabla 5.3: Puntos obtenidos para la curva madurez vs. resistencia ($f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$)	107
Tabla 5.4: Resultados de la implementación en un muro anclado.	109
Tabla 5.5: Resultados de la implementación del método de madurez en losas postensadas.	110
Tabla 6.1: Data utilizada para el modelo de Nurse - Saúl.	114
Tabla 6.2: Data utilizada para el modelo de Arrhenius.	116
Tabla 6.3: Data utilizada para el método del número de rebote.	118
Tabla 6.4: Data utilizada para el método de velocidad de pulso.	120
Tabla 6.5: Resumen de los ensayos no destructivos para la estimación de la resistencia a la compresión.	122

Tabla 6.6: Comparación de los resultados de resistencias en el muro anclado. 124

Tabla 6.7: Comparación de los resultados de resistencia para la edad de 3 días. 126

Tabla 6.8: Comparación de los resultados de resistencia para la edad de 7 días. 128

Tabla 6.9: Comparación de los resultados de resistencia para la edad de 28 días. 130

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Colapso del edificio en Fairfax, Condado de Virginia.	19
Figura 2.1: Falla por compresión del concreto.	23
Figura 2.2: Vista microscópica de la heterogeneidad de la masa del concreto.	25
Figura 2.3: Interacción de los factores responsables de la resistencia del concreto.	25
Figura 2.4: Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y la relación agua/cemento.	27
Figura 2.5: Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y el módulo de fineza del agregado.	28
Figura 2.6: Ensayo de compresión de una probeta cilíndrica.	29
Figura 2.7: Esquema general para el ensayo de resistencia a la compresión.	30
Figura 2.8: Esclerómetro o martillo de Schmidt en posición horizontal.	31
Figura 2.9: Ilustración de operación del martillo de rebote.	32
Figura 2.10: Esquema general para el ensayo del número de rebote.	33
Figura 2.11: Equipo de ultrasonido para ensayos en concreto.	35
Figura 2.12: Aparatos utilizados para el ensayo de ultrasonido.	36
Figura 2.13: Esquema general para el ensayo de ultrasonido en el concreto.	38
Figura 2.14: (a) Transmisión "directa" (b) Transmisión "semidirecta" (c) Transmisión "indirecta".	39
Figura 2.15: Gráfica de una relación típica entre la velocidad de pulso y	

la resistencia a la compresión para una mezcla de concreto.	40
Figura 3.1: Concepto simplificado de madurez del concreto.	44
Figura 3.2: Concepto gráfico del modelo de Nurse - Saúl.	45
Figura 3.3: Visualización esquemática de la ley de Saúl.	46
Figura 3.4: Concepto de madurez ponderada.	49
Figura 3.5: Curva madurez vs. resistencia.	52
Figura 3.6: Resultados de los ensayos realizados por Carino.	54
Figura 3.7: Aplicación del método de madurez en muros anclados.	56
Figura 3.8: El efecto "cross - over" en la resistencia del concreto.	57
Figura 3.9: Curva madurez - resistencia según modelo de Nurse - Saúl.	59
Figura 3.10: Curva madurez - resistencia según modelo de Arrhenius.	59
Figura 3.11: Límites válidos de la curva madurez-resistencia para la predicción de la resistencia del concreto en un elemento.	60
Figura 3.12: Método manual para la determinación de la madurez.	62
Figura 3.13: Ejemplo de un colector de datos externos.	62
Figura 3.14: Mecanismo de cálculo externo de madurez.	63
Figura 3.15: Ejemplo de caja registradora y un termómetro electrónico en el lado izquierdo y derecho respectivamente.	63
Figura 3.16: Colector interno de datos para la medición de la madurez.	64
Figura 3.17: Mecanismo de trabajo del colector vía inalámbrica.	64
Figura 3.18: Ejemplo de un equipo de segunda generación.	65
Figura 3.19: Construcción comercial en Frisco, Texas, USA.	66

Figura 3.20: Proyecto de intercambio vial "Dallas High Five", Texas, USA.	66
Figura 3.21: Proyecto de construcción Marriott Courtyad, Oklahoma, USA.	67
Figura 3.22: Proyecto de reparación del túnel Chingaza, Bogotá, Colombia.	67
Figura 4.1: Cemento Sol portland tipo I.	68
Figura 4.2: Análisis granulométrico para el agregado fino.	71
Figura 4.3: Análisis granulométrico para el agregado grueso.	72
Figura 4.4: Agregado fino y agregado grueso empleados.	76
Figura 4.5: Aditivo Sika 3 utilizado para el diseño de mezcla.	77
Figura 4.6: Poza de curado del LEM - UNI.	81
Figura 4.7: Máquina universal utilizada para el ensayo de compresión.	82
Figura 4.8: Termocupla tipo K y termómetro electrónico FLUKE.	85
Figura 4.9: Instalación de la termocupla en la probeta cilíndrica de concreto.	86
Figura 4.10: Curva temperatura vs tiempo.	86
Figura 4.11: Curva madurez vs. resistencia según el modelo de Nurse - Saúl.	89
Figura 4.12: Curva madurez vs. resistencia según el modelo de Arrhenius.	92
Figura 4.13: Perfil térmico del concreto elaborado el 31 de julio del 2014.	93
Figura 4.14: Perfil térmico del concreto elaborado el 06 de agosto del 2014.	93
Figura 4.15: Perfil térmico del concreto elaborado el 01 de setiembre del 2014.	94
Figura 4.16: Esclerómetro o martillo de Schmidt del LEM.	96
Figura 4.17: Curva número de rebote vs. resistencia.	98
Figura 4.18: Equipo V - meter MK IV del LEM.	99
Figura 4.19: Curva velocidad de pulso vs resistencia.	101

Figura 5.1: Vista del proyecto nuevo edificio corporativo GyM.	103
Figura 5.2: Aislador sísmico del proyecto nuevo edificio corporativo GyM.	104
Figura 5.3: Equipo Intellirock y termocupla.	105
Figura 5.4: Probetas utilizadas para la implementación del método de madurez.	107
Figura 5.5: Curva madurez vs. resistencia para un concreto de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$.	108
Figura 5.6: Mediciones de la madurez utilizando el equipo Intellirock.	108
Figura 5.7: Vaciado de la primera losa postensada.	110
Figura 5.8: Evaluación de la resistencia de una losa postensada.	110
Figura 6.1: Comparación de las resistencias estimadas por el modelo de Nurse - Saúl.	115
Figura 6.2: Comparación de las resistencias estimadas por el modelo de Arrhenius.	117
Figura 6.3: Comparación de las resistencia estimadas utilizando el método del número de rebote.	119
Figura 6.4: Comparación de las resistencias estimadas utilizando el método de velocidad de pulso.	121
Figura 6.5: Comparación de los ensayos no destructivos utilizados con respecto al método de probetas cilíndricas.	123
Figura 6.6: Desarrollo de la resistencia según el método de madurez y el de probetas cilíndricas en un muro anclado.	125
Figura 6.7: Desarrollo relativo para las resistencias del concreto utilizado en el proyecto.	127

Figura 6.8: Comparación de las resistencias a la edad de 3 días.	128
Figura 6.9: Comparación de las resistencias a la edad de 7 días.	130
Figura 6.10: Comparación de las resistencias a la edad de 28 días.	131
Figura A.1: Termocuplas tipo K y termómetro Fluke.	139
Figura A.2: Termómetro registrando la temperatura de una probeta.	140
Figura A.3: USB Fluke.	140
Figura A.4: Software CNX SW 3000.	141
Figura A.5: Ingreso de datos al software CNX SW 3000.	141

LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

ACI:	American Concrete Institute.
ASTM:	American Society for Testing and Materials.
LEM:	Laboratorio de Ensayo de Materiales.
NTP:	Norma Técnica Peruana.
a/c:	relación agua/cemento.
σ :	desviación estándar o desviación típica.
e:	número de Euler.
E:	módulo dinámico de elasticidad.
E_a :	energía aparente de activación.
f'_c :	resistencia a la compresión del concreto.
ρ :	densidad.
L:	distancia longitudinal.
M:	madurez del concreto.
M_w :	madurez ponderada.
μ :	módulo de Poisson.
rx:	coeficiente de correlación entre las variables x e y.
R:	constante de los gases.
S:	resistencia a la compresión para una madurez M.
t:	tiempo.
T_o :	temperatura Datum.
T:	temperatura interna del concreto.
T_r :	temperatura de curado bajo la cual se espera alcanzar la misma madurez que el historial de temperatura del concreto bajo investigación.
teq:	edad equivalente.
V:	velocidad de pulso.
\bar{x} :	promedio de un conjuntos de datos.

INTRODUCCIÓN

En los actuales proyectos de construcción, la mayoría de operaciones constructivas se encuentran condicionadas al desarrollo alcanzado de la resistencia a la compresión del concreto. Para conocer este parámetro, convencionalmente, se hace uso del método descrito en la ASTM C 39 - NTP 339.034, "*Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas*"

Sin embargo, los resultados generados por este método no siempre representan al valor de la resistencia que se encuentra en el elemento de concreto. Lo cual genera que se realice el uso de otros métodos que evalúan la resistencia a la compresión del concreto de manera indirecta. Por tal razón, la presente investigación tiene como objetivo principal realizar un análisis comparativo entre los métodos que estiman la resistencia a la compresión del concreto, principalmente al de madurez del concreto.

Durante el desarrollo de esta investigación, se verán siete secciones, las primeras tres abarcarán el marco teórico de la investigación. La primera sección de estas mostrará los antecedentes referidos al método de madurez; es decir que dio origen al estudio de este método, el problema presente, objetivos trazados, alcances y limitaciones que se tuvieron en la presente tesis. La segunda sección estudiará los métodos que permiten evaluar la resistencia a la compresión del concreto con excepción del método de madurez ya que este se verá netamente en la tercera sección del marco teórico.

Las tres siguientes secciones abarcarán el marco experimental de la investigación, la primera de estas será la presentación de los resultados obtenidos en un laboratorio a partir de la utilización de los diversos métodos que permiten estimar la resistencia a la compresión del concreto. La segunda de estas es similar al anterior con la diferencia que los resultados presentados son obtenidos en un proyecto nacional. Y la última sección del marco experimental es el análisis de los resultados para ambos casos. Finalmente, la última sección de la investigación tratará de las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: ANTEPROYECTO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se mencionarán las generalidades de la investigación, principalmente todas aquellas relacionadas al método de madurez del concreto, los puntos a verse son los siguientes.

1.1. ANTECEDENTES

Actualmente, se conoce que el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto varía de acuerdo a las condiciones climáticas que se encuentre sometido, concretos curados a altas temperaturas alcanzan resistencias mayores a edades iniciales que concretos curados a bajas temperaturas. Esta dependencia entre la resistencia a la compresión del concreto y las condiciones de temperatura que se encuentra sometido ocasiona dificultades para poder estimar la resistencia del concreto en estudio.

El no poder estimar o estimar de forma incorrecta la resistencia a la compresión del concreto puede generar consecuencias graves en un proyecto, tal como fue el caso de la edificación en Fairfax, Condado de Virginia. El 2 de marzo de 1973, la losa del edificio en el condado de Virginia sufrió un colapso progresivo, véase figura 1.1, que trajo consigo la muerte de catorce obreros y treinta y cuatro heridos. De acuerdo a los estudios de ingeniería forense, las causas más probables de este acontecimiento fue en primer lugar el retiro prematuro de los puntales que sostenían a esa losa, lo cual produjo esfuerzos mayores a los admisibles en ese elemento.

La otra razón probable fue el retraso en el proceso del curado de la losa, lo cual conlleva a que la resistencia del concreto en ese elemento sea menor a la proporcionada por las probetas de control.

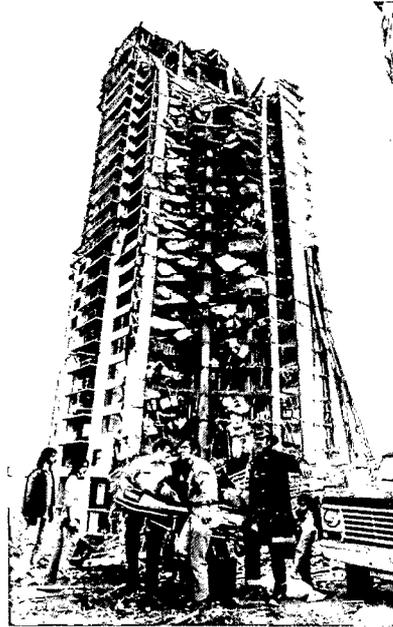


Figura 1.1: Colapso del edificio en Fairfax, Condado de Virginia.

A partir de este suceso se comenzó a buscar un método que permita estimar la resistencia del concreto in situ y que tome en cuenta las condiciones de curado a las que se encuentre sometido. El método que se decidió por optar fue el de "madurez del concreto" debido a que este método se basa en los siguientes puntos:

- La resistencia a la compresión del concreto deriva de la hidratación del cemento.
- Esta hidratación es una reacción exotérmica, es decir, produce calor.
- Si esta cantidad de calor pudiera medirse, entonces se puede estimar la resistencia a la compresión del concreto.

Sin embargo, en esos tiempos, no pudo hacerse uso de ese método debido a que no existía una normativa y además también porque no se contaba con el equipo necesario para poder realizarlo. No fue hasta el año de 1987 que la Asociación Americana para Ensayos de Materiales, ASTM, aprobará por primera vez la norma ASTM C 1074, "*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*", que estandarizó el procedimiento para poder estimar la resistencia del concreto a partir del conocimiento de la madurez.

Gracias a ello, el método de madurez es usado hoy en día como una alternativa para poder estimar la resistencia a la compresión del concreto en proyectos de construcción.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es hoy en día uno de los materiales de construcción más utilizado en diversos proyectos de construcción, por ejemplo: edificios, carreteras, represas hidráulicas, etc.

Una de las propiedades mecánicas, que un constructor desea conocer, es la resistencia a la compresión del concreto; usualmente este parámetro se determina por medio del ensayo descrito en la norma ASTM C39, "*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*", en la cual se describe la elaboración de probetas cilíndricas que resultan ser los indicadores de cómo evoluciona la resistencia a la compresión del elemento de concreto, pero que tanto representa esta resistencia a la resistencia que se encuentra en el elemento.

Son muchas las razones que indicarían que la resistencia del elemento de concreto es diferente a la resistencia de su probeta cilíndrica de control, entre ellas tenemos:

- Las probetas tienen diferente geometría que el elemento de concreto, las probetas tienen un volumen pequeño pero grandes áreas superficiales, por lo tanto retienen poco calor en comparación a un elemento de concreto como el caso de una losa.
- Las probetas poseen un historial de curado ideal, es decir el de un laboratorio, mientras que los elementos de concreto poseen otro historial de curado, se encuentran a las condiciones climáticas del lugar de trabajo.
- Aunque ambos posean similares formas de elaboración, en algunos casos, una elaboración inapropiada, ya sea en la probeta o en el elemento, traerá consecuencias negativas en la resistencia a la compresión de dichos elementos.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo general consiste en *realizar un análisis comparativo entre los métodos que permiten estimar la resistencia a la compresión del concreto*. Lo cual conlleva a realizar los siguientes objetivos específicos.

- Presentar la metodología de funcionamiento de la madurez del concreto.
- Comparar los resultados entregados por el método de madurez del concreto, probetas cilíndricas, esclerómetro y pulso ultrasónico.
- Evaluar la precisión del método de madurez del concreto.
- Conocer las ventajas y desventajas del método de madurez del concreto.

1.4. ALCANCES

Primeramente, se establecerá la curva madurez vs resistencia del concreto para así poder estimar la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas a partir del conocimiento de su madurez. La obtención de la madurez del concreto se hará a partir del historial de temperatura del concreto, el cual será efectuado con un intervalo de 15 minutos para los primeros cinco días, después de esto el intervalo será ampliado a una hora hasta alcanzar la edad de 28 días.

Una vez establecida dicha relación se procederá a ensayar a edades dentro del rango de un día hasta 28 días. Los ensayos consistirán en la utilización de métodos como probetas cilíndricas, número de rebote, velocidad de pulso y madurez; con la finalidad de obtener una comparación entre la resistencia proporcionada por estos métodos.

En el caso del concreto a emplearse, se pretende utilizar dos diseños de concreto para la respectiva investigación, el primer diseño se estudiará en un laboratorio nacional. Mientras que el segundo diseño, el cual pertenecería a un concreto premezclado de un proveedor de nuestro medio local, sería estudiado con el fin de poder implementar el método de madurez del concreto en un proyecto de construcción nacional.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos no se podrán generalizar para cualquier proyecto, ya que uno de los fundamentos básicos de la madurez del concreto es que la curva madurez vs resistencia es única y solamente única para cada diseño, a menos que el concreto que se esté utilizando posea similares características al estudiado en esta investigación.

1.5. LIMITACIONES

- En nuestro país se conoce muy poco sobre el método de madurez del concreto, debido a eso se utilizará normas e investigaciones y/o reportes internacionales respecto a este tema, con la excepción de la utilización de la norma nacional NTP 339.217, "*Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas*".
- La metodología del ensayo para determinar la resistencia del concreto por medio del conocimiento de su madurez será por medio de la norma ASTM C1074, "*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*".
- La determinación de la madurez del concreto se realizará utilizando el modelo de Nurse – Saúl y Arrhenius.
- Para efectos de aplicación del método de madurez, como sugerencia de investigaciones extranjeras, se asumirá una temperatura datum igual a 0°C.
- Para calcular la madurez del concreto se hará uso de un equipo compuesto por termocuplas del tipo K y termómetros electrónicos con precisión al décimo en las lecturas de temperaturas.

CAPÍTULO II: MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

Este capítulo estudiará los métodos que permiten estimar la resistencia a la compresión del concreto; se empezará viendo que es la resistencia a la compresión y cuáles son los factores que la influyen, finalmente se indicarán los métodos estandarizados a utilizarse en esta investigación.

2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

La resistencia a la compresión del concreto se puede definir como su capacidad para resistir esfuerzos axiales de compresión sin fallar. Este esfuerzo se genera por medio de la aplicación gradual de una fuerza de compresión al concreto, como se puede apreciar en la figura 2.1.

Llegará un momento en el cual las fuerzas internas del concreto alcancen un valor máximo que ya no puedan soportar la fuerza externa de compresión, es decir se encuentre a punto de fallar. Dicha máxima fuerza interna dividida entre el área del concreto expuesta a la carga externa se conoce como la resistencia a la compresión.



Figura 2.1: Falla por compresión del concreto.

La resistencia a la compresión de las mezclas del concreto se puede diseñar de tal manera que tenga una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad,

que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura. Este parámetro es la propiedad más valorada en el concreto, ya sea porque es el principal indicador de la fortaleza del material o porque es una propiedad que se relaciona con la mayoría de las otras características del concreto, como son su resistencia al esfuerzo cortante, su módulo de elasticidad o su permeabilidad.

2.1.1. Naturaleza de la resistencia a la compresión del concreto

El concreto es una masa endurecida de carácter discontinuo y heterogéneo. El cemento hidratado, es una masa semi cristalina discontinua con un elevado grado de porosidad, que contiene agua libre y agua no evaporable. Además, esta agua libre al exudar y evaporarse deja micro poros y canales capilares continuos en el gel de cemento, que posteriormente se convierten en medios para intercambio de humedad del concreto con el medio ambiente en que se encuentre.

La heterogeneidad del concreto se debe notablemente a la presencia de agregados, véase figura 2.2, ya que estos poseen una diversidad de tamaños, textura superficial y geometría de sus partículas. Todas estas características son las responsables de no lograr una buena adherencia entre la pasta de cemento y cada una de las partículas de agregado, sin embargo, actualmente existen ciertos materiales que adicionados a la mezcla del concreto mejoran la adherencia entre las partículas mencionadas, como es el caso de la micro sílice o la nano sílice.

A pesar de que el concreto posee una naturaleza heterogénea y discontinua, resulta útil para la disipación de energía debido a cargas estáticas y/o dinámicas.

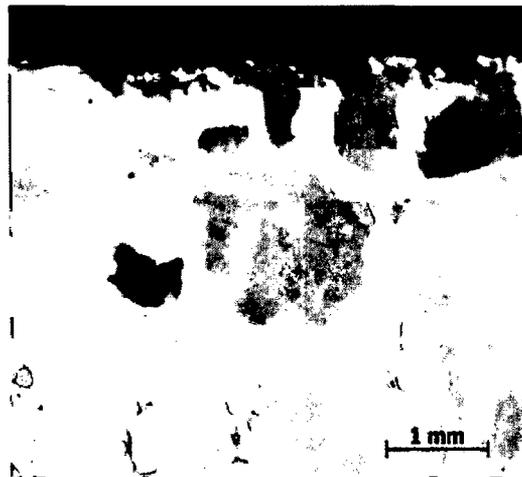


Figura 2.2: Vista microscópica de la heterogeneidad de la masa del concreto

Las diversas investigaciones realizadas en torno a la resistencia a la compresión del concreto muestran que esta resistencia se debe principalmente a tres factores:

- La resistencia de la pasta hidratada y endurecida, llamada matriz.
- La resistencia de las partículas del agregado.
- La resistencia de la interfase matriz-agregado.

En la figura 2.3, se muestra la interacción de estos tres componentes en un concreto sin adiciones.

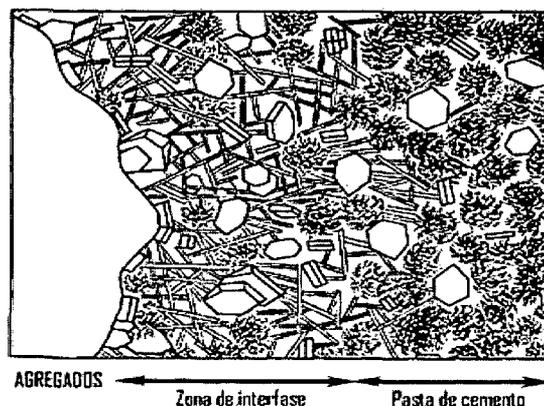


Figura 2.3: Interacción de los factores responsables de la resistencia del concreto.

Cada uno de los factores anteriormente mencionados varía de un concreto a otro, por ejemplo, la adición de microsílíce genera una mayor resistencia en la interfase matriz-agregado.

2.1.2. Ley de Duff Abrams

En el año de 1918, Duff Abrams junto a otros investigadores realizaron un extenso trabajo referido al diseño de mezclas de concreto en el Instituto Lewis, Universidad de Illinois.

El principal interés de Abrams por investigar el diseño de mezclas de concreto era que los métodos con que se contaban no generaban resultados satisfactorios. Estos métodos tenían el concepto de que a mayor densidad del agregado o densidad del concreto, mayor sería la resistencia del concreto. Lo cual no era cierto, y además Abrams demostró que estos métodos basados en el análisis granulométrico de agregados contaban con una teoría errónea.

La falta de precisión de todos estos métodos que se tenían en el pasado, se debe a que no tomaban en cuenta el contenido de agua en la mezcla. Abrams encontró que pequeños cambios en el contenido de agua generaba importantes variaciones en la resistencia del concreto y así como también en otras propiedades.

El experimento realizado por Abrams mostraba una particularidad en cuanto a la relación agua/cemento (a/c) y la resistencia a la compresión del concreto, a mayor relación a/c menor era la resistencia y viceversa. Su experimento consistió en realizar ensayos de resistencia a la compresión a diversas mezclas de concretos, cuyas relaciones de volúmenes cemento: agregado fino variaban desde 1:15 hasta cemento puro y además que los tamaños de agregados de las mezcla variaban desde la malla 1 ½" (38.1mm) hasta la malla N° 14 (1.17 mm).

Para estas condiciones, Abrams encontró que la mejor curva de ajuste entre los parámetros resistencia a la compresión y relación agua/cemento era una del tipo exponencial, véase figura 2.4, cuya ecuación fue de la siguiente forma:

$$f'c = \frac{14000}{7\left(\frac{a}{c}\right)}$$

Donde:

$f'c$: Resistencia a la compresión del concreto en lb/in².

a/c : Relación de volúmenes de agua y cemento en la mezcla.

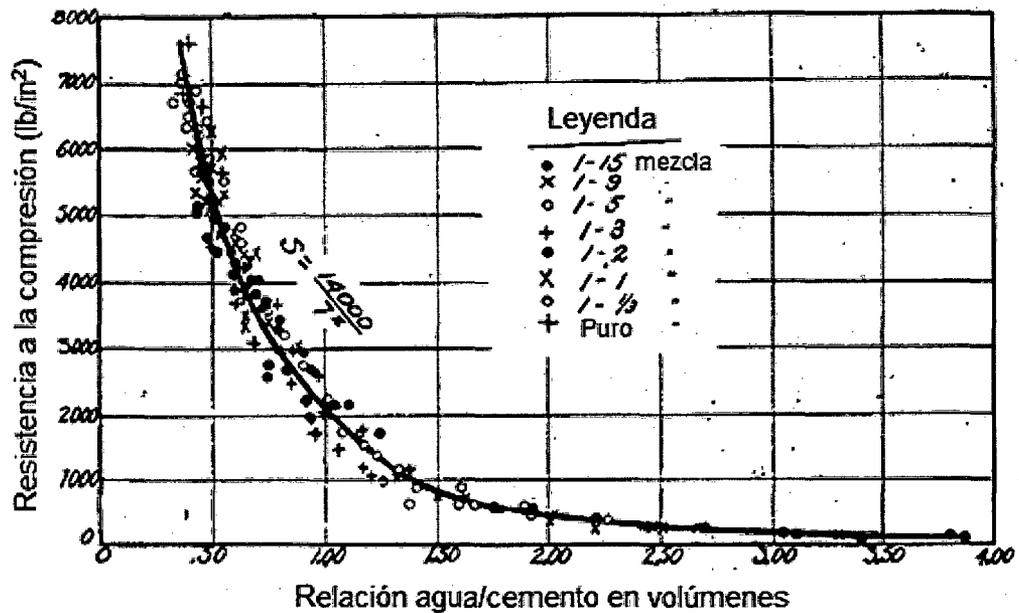


Figura 2.4: Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y la relación agua/cemento.

Adicionalmente, Abrams encontró que el módulo de fineza de los agregados guardaba relación con la resistencia del concreto, a mayor módulo de fineza mayor será la resistencia, véase figura 2.5. La razón de esta relación es debido a que cada módulo de fineza implica una condición plástica de la mezcla, la cual a la larga se encuentra condicionada a la relación agua/cemento existente.

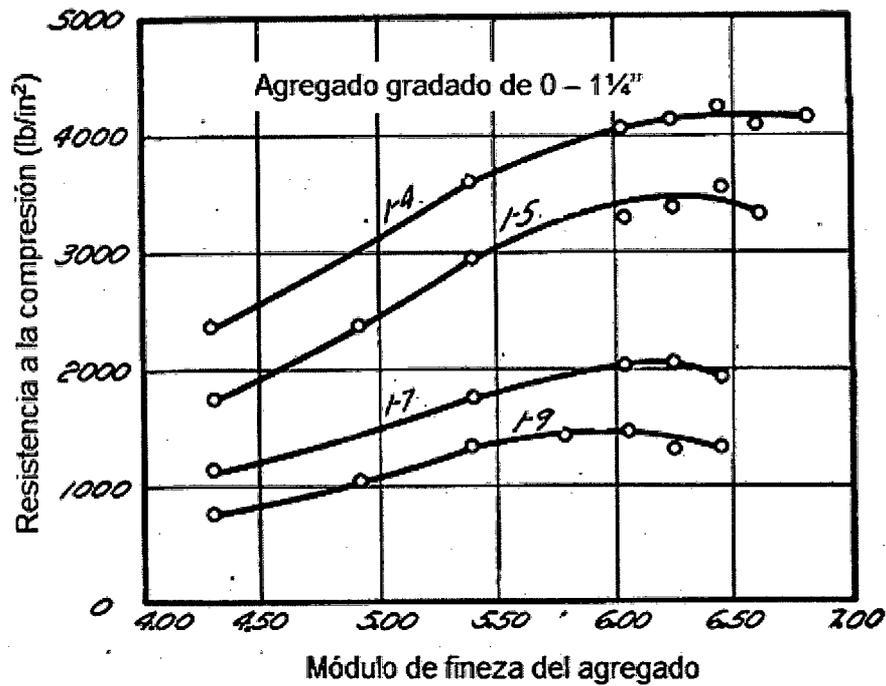


Figura 2.5: Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y el módulo de fineza del agregado.

En resumen, la investigación realizada por Abrams sugiere que la resistencia a la compresión del concreto se debe a la interrelación de los siguientes factores: la consistencia de la mezcla (cantidad de agua en la mezcla), el tamaño y la graduación de los agregados, la mezcla (dosificación del cemento).

Actualmente la ley de Abrams es usada para predecir la relación agua/cemento que se utilizará en un concreto de resistencia específica, sin embargo para resistencias mayores a 450 kg/cm², no se recomienda utilizar la ley de Abrams.

2.2. MÉTODOS ESTANDARIZADOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

2.2.1. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas – ASTM C39 – NTP 339.034

Este método se encuentra descrito en la ASTM C39, "*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*", o la misma que en nuestro medio sería la NTP 339.034, "*Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas*".

El propósito de este método consiste en determinar la resistencia a la compresión del concreto, para este fin se utiliza una máquina universal que transmitirá fuerzas uniaxiales de compresión a la probeta en ensayo hasta que la falla ocurra, véase figura 2.6. Por lo expuesto anteriormente es que a este método se le clasifica como un ensayo destructivo.



Figura 2.6: Ensayo de compresión de una probeta cilíndrica.

La elaboración de las muestras cilíndricas de concreto se encuentra descrito en la ASTM C 192 o NTP 339.183, "*Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio*". A continuación en la figura 2.7, se muestra un diagrama de flujo que muestra el esquema general del proceso de elaboración, curado y ensayo.

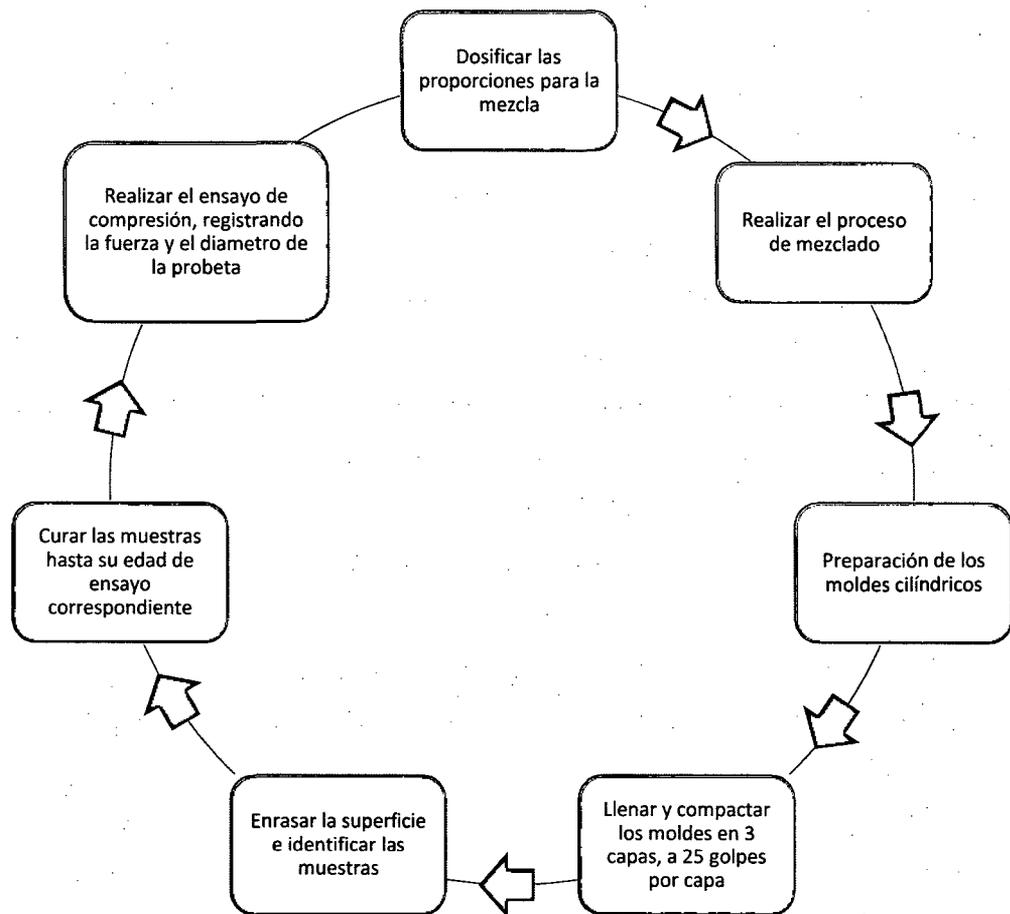


Figura 2.7: Esquema general para el ensayo de resistencia a la compresión

Algunas comentarios que se puede dar respecto al anterior esquema son que las herramientas empleadas para la mezcla y preparación de moldes cilíndricos son una varilla ($\varnothing 5/8''$, 60 cm), un mazo de goma ($600 \pm 200g$), una plancha para enrasar, una mezcladora que puede ser un trompo o una tolva y por supuesto los moldes cilíndricos.

Estos moldes pueden tener dos tipos de tamaño de 15cm x 30 cm o de 10cm x 20 cm, y además suelen ser metálicos o plásticos en su mayoría. El curado se realiza en pozas de curado con un agua de pH aproximadamente igual a 7, este proceso es para maximizar la hidratación del concreto que posteriormente se ve reflejado en varias propiedades, entre ellas la resistencia a la compresión del concreto.

En cuanto al ensayo de compresión cabe mencionar que los valores obtenidos dependerán de la forma y tamaño de los especímenes, el proceso de mezclado, los métodos de muestreo, la edad de ensayo, condiciones de curado, condiciones de clima, entre otros factores.

Además, de acuerdo con la norma ASTM C 39 - NTP 339.034, este método menciona que su coeficiente de variación, variable estadística que refleja la precisión de un método, en condiciones de laboratorio es de 2.4% mientras que en condiciones de obra es de 2.9%

2.2.2. Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido – ASTM C 805 – NTP 339.181

Descrito en la ASTM C 805, "*Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*", o la que en nuestro medio sería la NTP 339.181, "*Método de ensayo para determinar el número de rebote del hormigón (concreto) endurecido (esclerometría)*".

El objetivo de este método radica en obtener el número de rebote de una superficie de concreto endurecido utilizando un martillo denominado esclerómetro, como se puede apreciar en la figura 2.8.



Figura 2.8: Esclerómetro o martillo de Schmidt en posición horizontal.

Para realizar este ensayo, se tiene que liberar el émbolo del esclerómetro y poner en contacto con la superficie de concreto a ensayar. Después de esto, se tiene que ir comprimiendo lentamente el émbolo hasta que el mecanismo interno del equipo no permita que se siga comprimiendo, véase figura 2.9.

Esta acción generará que el martillo impacte con una predeterminada cantidad de energía que se refleja por medio de la distancia que el resorte interno del martillo rebote y se expresa cuantitativamente por la lectura de un parámetro denominado número de rebote.

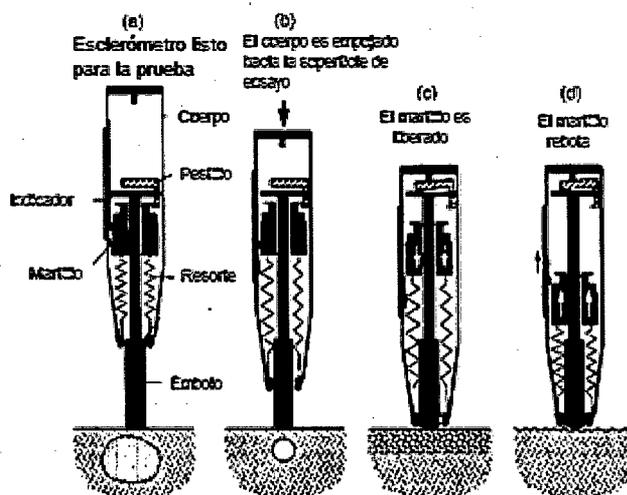


Figura 2.9: Ilustración de operación del martillo de rebote.

El principio de este método se basa en que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie sobre la que golpea la masa, antiguamente se creía que la dureza de un material estaba relacionada con la resistencia del material.

A pesar que hoy en día se conoce que no existe una relación especial entre estas dos variables, el número de rebote es un indicador que da una idea de cómo está evolucionando la resistencia del concreto en diferentes partes, lo cual puede ayudar a evaluar la uniformidad del concreto en estudio.

De acuerdo a la ACI 228.1R, *"In-Place Methods to Estimate Concrete Strength"*, la clave para entender las limitaciones inherentes a este método es reconociendo los factores que influyen en la distancia del rebote. Esta distancia depende de la energía cinética que posee el martillo antes de impactar con la superficie a testear y de la cantidad de energía durante el impacto. Parte de esta energía es absorbida en la fricción interna del instrumento, mientras que la otra parte es absorbida en la interacción entre el embolo y la superficie del concreto.

Esta última energía es la que se utiliza como indicador de ciertas propiedades del concreto, como son la rigidez y la resistencia. Un concreto de baja resistencia y rigidez absorberá más energía que un concreto de alta resistencia y rigidez, lo cual implica que el martillo rebotará menos y por ende nos registrará una lectura menor del número de rebote.

Cabe mencionar que de acuerdo a algunas experiencias registradas con el uso de este método, indican que en una mezcla es posible tener dos probetas de resistencias iguales pero con diferentes números de rebote. Al igual que tener lo contrario, o sea tener dos probetas con mismo número de rebote pero diferentes resistencias.

La explicación que se le dio a esto fue que el número de rebote depende principalmente de la rigidez por parte del concreto, y esta propiedad se ve afectada por el tipo de agregado que se tenga, ya que este último es el esqueleto de la mezcla. Y además que el rebote también depende de la zona de ensayo, a veces se puede obtener resultados erróneos debido a la presencia de una partícula grande o de un vacío cerca de la zona de ensayo, como se puede visualizar en la figura 2.9

Otras fuentes de error que influyen en los resultados proporcionados por el método del número de rebote son la carbonatación, a mayor carbonatación mayor será el número de rebote, lo cual no necesariamente es la lectura real. Similarmente ocurre con la humedad de la superficie, una superficie seca dará un número de rebote mayor que una superficie húmeda.

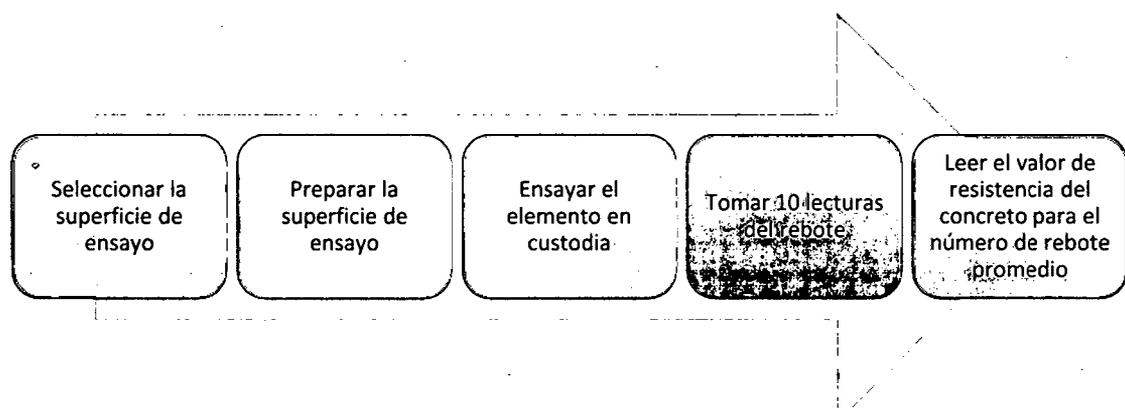


Figura 2.10: Esquema general para el ensayo del número de rebote.

En la figura 2.10, se muestra un esquema general para el ensayo por medio del método de número de rebote, algunos comentarios que se puede dar al respecto son los siguientes.

Existe tres formas de realizar este ensayo, verticalmente, horizontalmente u oblicuamente, la opción a elegir dependerá de las condiciones que se tenga en la superficie. Respecto a estas deberán tener como mínimo un espesor de 10 cm y además estar lo suficientemente rígidas para el ensayo, otro punto es que el área de superficie debe tener al menos 15 cm de diámetro.

En cuanto a las 10 lecturas que se toma, se debe determinar su promedio y además aquellas lecturas que sobrepasen de 6 unidades del promedio deberán ser descartados. Y con las lecturas que cumplan se deberá calcular un nuevo promedio, en el caso que más de 2 lecturas difieran de 6 unidades, se deberá hacer una nueva toma de lecturas.

La precisión de este método, según la ASTM C 805, es que para un mismo operador se puede obtener una desviación estándar igual a 2.5 en la toma de datos.

2.2.2.1. Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión en base al número de rebote

De acuerdo a la ACI 228.1 R, "*In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*", el procedimiento para estimar la resistencia a la compresión en base al número de rebote es el siguiente:

- Al menos 12 probetas deben ser elaboradas para poder realizar este procedimiento.
- En cada edad de ensayo, deberá medirse un conjunto de 10 números de rebotes obtenidos de cada par de probetas. La dirección del ensayo debe ser el mismo de la dirección de la gravedad, es decir de manera vertical.
- Al realizar cada ensayo, debe asegurarse que la superficie de ensayo sea lo suficientemente rígido con el fin de evitar lecturas bajas del número de rebote.

- Para tener buenas estimaciones en la resistencia a la compresión, deberá tenerse especímenes elaborados y curados en las mismas condiciones de humedad.
- Para las edades de ensayo 1, 3, 5, 7, 14 y 28 días, teniendo su número de rebote y resistencia a la compresión, se elaborará una curva que mejor se ajuste a estos puntos. La ACI 228.1 R no menciona que tipo de curva usar, de acuerdo a las investigaciones "*Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests*" y "*Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings*" la más recomendable es usar uno del tipo lineal.
- Con la curva ajustada, se ingresa el número de rebote registrado y por ende se obtiene la resistencia estimada.

2.2.3. Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto – ASTM C 597 – NTP 339.237

La norma que describe este método es la ASTM C 597, "*Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*", la misma que en nuestro medio sería la NTP 339.237, "*Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto*".

Este método busca determinar las velocidades de las ondas de compresión que viajan a través del concreto por medio del uso de un equipo electro-acústico, que se aprecia en la figura 2.11.

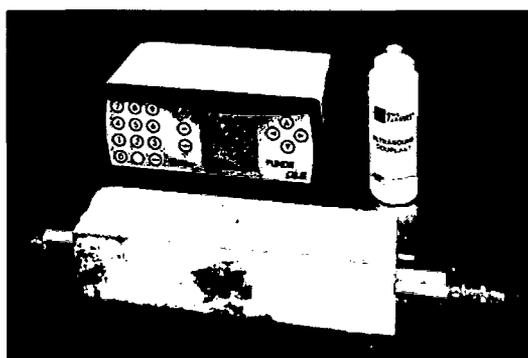


Figura 2.11: Equipo de ultrasonido para ensayos en concreto.

Conociendo esta velocidad, se puede evaluar la uniformidad y relativa calidad del concreto en estudio, además indicar si existe o no la presencia de fisuras y/o huecos. También puede ser usado en la medición del módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, etc.

Sin embargo, la misma norma ASTM C 597 menciona que los valores generados por este método no son adecuados como para poder ser utilizados en el diseño de una estructura de concreto.

En la figura 2.12 se muestran los aparatos utilizados para poder desarrollar el método de la velocidad de pulso.

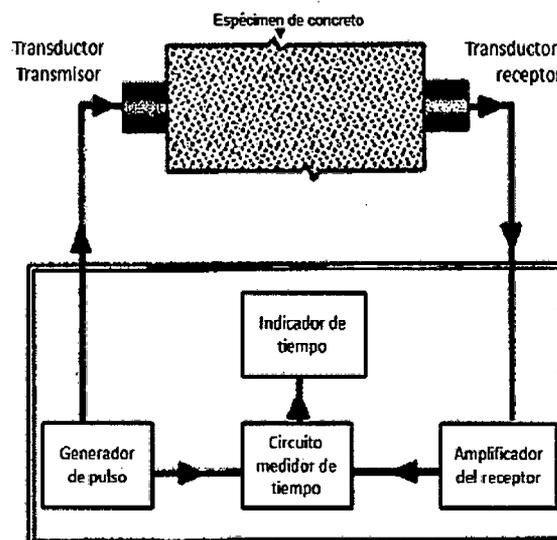


Figura 2.12: Aparatos utilizados para el ensayo de ultrasonido.

➤ **Generador de pulso y transductor transmisor**

El generador de pulso debe consistir de los circuitos para la generación de pulsos de voltaje. El transductor para transformar estos pulsos electrónicos en ráfagas de ondas de energía mecánica debe tener una frecuencia de resonancia en el rango de 30 a 100 kHz. El generador de pulso debe producir pulsos repetitivos a una velocidad de por lo menos 3 pulsos por segundo. El intervalo de tiempo entre los pulsos, debe exceder el tiempo de decaimiento del transductor transmisor. El transductor debe ser construido de un material piezoeléctrico, magnetostrictivo o de otro material sensitivo al voltaje, y debe

ser protegido por una cubierta protectora. Se requiere de un pulso de activación para arrancar el circuito medidor de tiempo.

➤ Transductor receptor y amplificador

El transductor receptor debe ser similar al transductor transmisor. El voltaje generado por el receptor debe ser amplificado cuando sea necesario para producir ráfagas de pulsos al circuito medidor de tiempo. El amplificador debe tener una respuesta plana entre la mitad y tres veces la frecuencia de resonancia del transductor receptor.

➤ Circuito medidor de tiempo

El circuito medidor de tiempo y las ráfagas de pulsos asociados deben ser capaces de proveer una resolución de medición de tiempo, de por lo menos 1 μ s. La medición de tiempo es indicada por una ráfaga de voltaje del generador de pulso, y el circuito medidor de tiempo debe operar a la misma frecuencia de repetición del generador de pulso. El circuito medidor de tiempo debe proveer una potencia de salida cuando detecta el pulso recibido, y esta potencia de salida cuando detecta el pulso recibido, y esta potencia de salida debe ser usada para determinar el tiempo de transito desplegado en el indicador de tiempo. El circuito medidor de tiempo debe ser insensible a temperaturas de operación en el rango de 0 a 40°C y a cambios de voltaje en la fuente de potencia, de $\pm 15\%$.

➤ Barra de referencia

Para unidades que usan un ajuste manual a tiempo cero, debe proveerse una barra de metal o de otro material durable, para la cual se sepa el tiempo de transito de las ondas longitudinales. El tiempo de transito debe ser marcado permanentemente en la barra de referencia. La barra de referencia es de uso opcional para las unidades que tengan un ajuste automático al tiempo cero.

➤ Cables de conexión

Cuando las medidas de velocidad pulso en estructuras grandes requieren del uso de cables de interconexión largos, se debe usar cables coaxiales, protegidos, de baja capacitancia.

➤ Agente de acoplamiento

Debe ser de un material viscoso (tal como aceite, gelatina de petróleo, gelatina soluble en agua, hule moldeable o grasa), para asegurar una transferencia eficiente de energía entre el concreto y los transductores. La función del agente de acoplamiento es la de eliminar el aire entre las superficies de concreto de los transductores y el concreto. El agua puede ser un agente de acoplamiento aceptable cuando forma un estanque superficial, o en los ensayos bajo el agua.

Para poder realizar este ensayo, véase la figura 2.13, la cual muestra un esquema general del procedimiento de esta prueba.

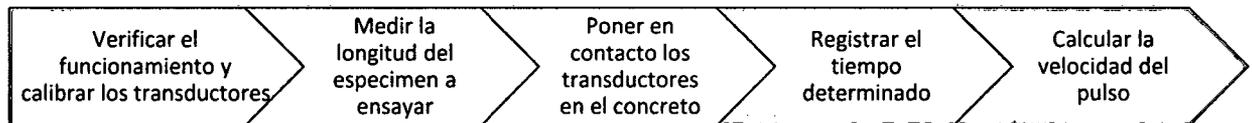


Figura 2.13: Esquema general para el ensayo de ultrasonido en el concreto.

De acuerdo a la figura anterior, el primer paso a realizar es verificar y calibrar los transductores del equipo, para eso se deberá esparcir el agente de acoplamiento en los transductores y ponerlos en contacto con la barra de referencia o en caso de contar con un equipo moderno poner en contacto ambos transductores. La calibración terminará cuando el tiempo de viaje de las ondas que indica la barra de referencia sea igual al del indicador de tiempo del equipo en uso.

Existen tres maneras de poner en contacto los transductores en el concreto, véase figura 2.14, se recomienda o es preferible utilizar la transmisión directa ya que otorga una mejor medición con respecto a las otras.

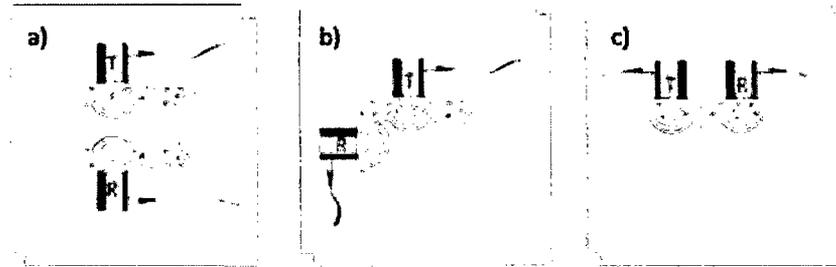


Figura 2.14: (a) Transmisión “directa” (b) Transmisión “semidirecta” (c) Transmisión “indirecta”.

Cabe mencionar que deberá tenerse cuidado de escoger las zonas de ensayo para el caso de concreto armado, ya que la presencia de acero puede entregar lecturas erróneas en la velocidad. Para el cálculo de la velocidad, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{L}{t}$$

Donde:

V: Velocidad de pulso, m/s.

L: Distancia entre los transductores, m.

t: Tiempo de viaje de las ondas de compresión, s.

Según la ASTM C 597, la precisión de este método para distancias entre 0.3 a 6 m, utilizando diferentes instrumentos por un mismo operador o utilizando un instrumento por diferentes operadores, está en el rango del $\pm 2\%$.

Determinando la velocidad de propagación de las ondas de compresión a través del concreto, se puede obtener el módulo de elasticidad empleando la siguiente fórmula:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

Donde:

V: Velocidad de pulso, m/s.

E: Módulo dinámico de elasticidad, kg/m.s².

μ : Módulo de Poisson.

ρ : Densidad, kg/m³.

La idea de que a partir del conocimiento de la velocidad de pulso se podía estimar la resistencia a la compresión nació en base a que esta última propiedad guarda relación con el módulo de elasticidad. Sin embargo, a medida que el concreto endurece, el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión evolucionan a diferentes ritmos. A edades iniciales, el módulo de elasticidad incrementa a un ritmo mayor que la resistencia, mientras que a edades posteriores el ritmo de incremento del módulo de elasticidad es menor. Lo cual demuestra, que la relación entre la velocidad de pulso y resistencia a la compresión no es una función lineal, como se visualiza en la figura 2.15.

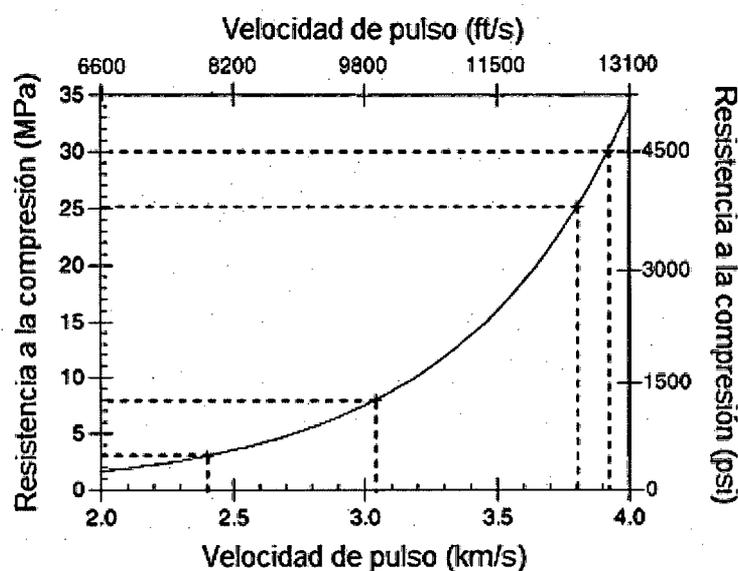


Figura 2.15: Gráfica de una relación típica entre la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión para una mezcla de concreto.

De la figura anterior se puede apreciar que para edades tempranas, un incremento en la resistencia del concreto generará un incremento relativamente grande en la

velocidad de pulso, mientras que a edades posteriores, la velocidad incrementará levemente con un incremento de la resistencia.

La ACI 228.1R, *"In-Place Methods to Estimate Concrete Strength"*, menciona que algunos factores que pueden afectar la velocidad de pulso son el tipo y cantidad de agregado en el concreto, ya que a medida que el contenido volumétrico de agregado incrementa, la velocidad también lo hará. Pero la resistencia a la compresión no será afectada apreciablemente.

Otro factor importante es el contenido de humedad del concreto, es sabido que si se tiene una humedad mayor que las condiciones saturadas al aire libre, la velocidad puede incrementar hasta en un 5%.

Finalmente otro factor también es la presencia del refuerzo de acero en el caso de concreto armado, debido a que se sabe que la velocidad de pulso en el acero puede ser 40% más que en el concreto, lo cual generaría conclusiones erróneas.

2.2.3.1. Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión en base a la velocidad de ultrasonido.

Para poder estimar la resistencia en base a la velocidad de ultrasonido, se verá el procedimiento que recomienda la ACI 228.1 R:

- En el caso de realizar estimaciones de resistencias en concreto en obra, deberá ensayarse en diamantinas obtenidas de la estructura en estudio. Ya que si se utilizara las probetas cilíndricas normalizadas, se tendría una mala correlación debido a que este concreto y el de la estructura poseen diferentes condiciones de humedad.
- En cada espécimen o estructura en ensayo, deberá realizarse 5 mediciones de velocidad de pulso o al menos 3 con tal que la lectura sea estable.
- Para cada medición, los transductores deberán ser desacoplados de la superficie y acoplarse de nuevo de tal manera que se evite errores sistemáticos del propio equipo.
- Teniendo la velocidad de pulso y resistencia a la compresión para cada edad de ensayo, el siguiente paso es elaborar la curva que mejor se ajuste a estos

puntos. Nuevamente la ACI 228.1 R no menciona que tipo de función utilizar para este propósito, de acuerdo a la investigación "*Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests*" la más recomendable y utilizada es una función cuadrática.

- Con la curva obtenida, en base a su ecuación, ingresamos el valor de la velocidad de pulso y por lo tanto se obtiene un valor de la resistencia a la compresión.

CAPÍTULO III: MÉTODO DE MADUREZ DEL CONCRETO

Este capítulo abarcará los lineamientos generales referidos al método de madurez del concreto, parte teórica central de la investigación, este método es una técnica que considera los efectos combinados del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia del concreto, es decir, que a partir del conocimiento de la temperatura interna del concreto se puede estimar su resistencia a la compresión.

3.1. CONCEPTO DE MADUREZ DEL CONCRETO

La norma ASTM C 1074 - NTP 339.217, "*Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez*", define a la madurez del concreto como la extensión del desarrollo de una propiedad de una mezcla cementante, y además indica que este concepto no sólo puede referirse al desarrollo evolutivo de la resistencia, también puede ser aplicado a la evolución de cualquier propiedad dependiente de las reacciones químicas que ocurran en una mezcla cementante.

Sin embargo, la anterior definición no deja bien esclarecido el concepto de madurez, McIntosh (1949) y Nurse (1949), Saúl (1951) indicaron que la madurez es la variable que se encarga de medir la cantidad de calor interno generado en el concreto a lo largo de su evolución. Dicho calor es representado por medio de los efectos combinados de temperatura y tiempo, cuyo producto de ambas variables representa la madurez del concreto. Esto mismo puede expresarse como el área bajo la curva del historial de la temperatura interna del concreto en estudio, la cual puede apreciarse en la figura 3.1.

Para esta investigación en particular la madurez estará relacionada con la resistencia a la compresión del concreto.

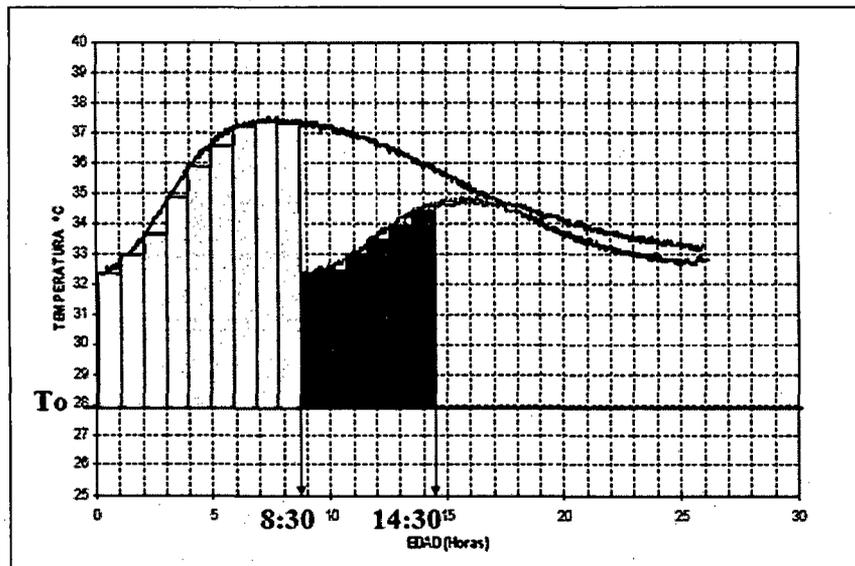


Figura 3.1: Concepto simplificado de madurez del concreto.

El término T_0 de la anterior figura hace referencia al concepto de temperatura datum, concepto que será visto en el punto 3.2.1.

3.2. MODELOS PARA DETERMINAR LA MADUREZ DEL CONCRETO

En esta sección se estudiarán los modelos más importantes que permiten determinar la madurez del concreto, cabe destacar que la norma ASTM C1074 sólo toma en cuenta el modelo de Nurse - Saúl y el modelo de Arrhenius.

3.2.1. Modelo de Nurse - Saúl

El modelo de Nurse - Saúl, o también llamado factor de temperatura y tiempo, se basa en los conceptos propuestos por McIntosh, 1949.

McIntosh fue el primero en notar que la ganancia de la resistencia a la compresión del concreto se encuentra relacionada con el tiempo de curado y su historial de temperatura. De hecho, en base a esa experiencia, él propuso la siguiente hipótesis: *“la velocidad de endurecimiento del concreto en cualquier momento es directamente proporcional a la cantidad en la que la temperatura de curado excede a la temperatura datum”*.

El concepto de temperatura datum fue definido como la temperatura bajo la cual empieza el proceso de endurecimiento del concreto, en base a esta propuesta realizada por McIntosh. Nurse y Saúl proponen en 1950 el siguiente modelo.

$$M_s = \sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t$$

Donde:

M_s : Madurez del concreto al tiempo t ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$).

t : Tiempo del proceso de endurecimiento del concreto. (horas o días).

T : Temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt .

T_0 : Temperatura datum ($^{\circ}\text{C}$).

Esta misma función matemática se puede expresar en la figura 3.2:

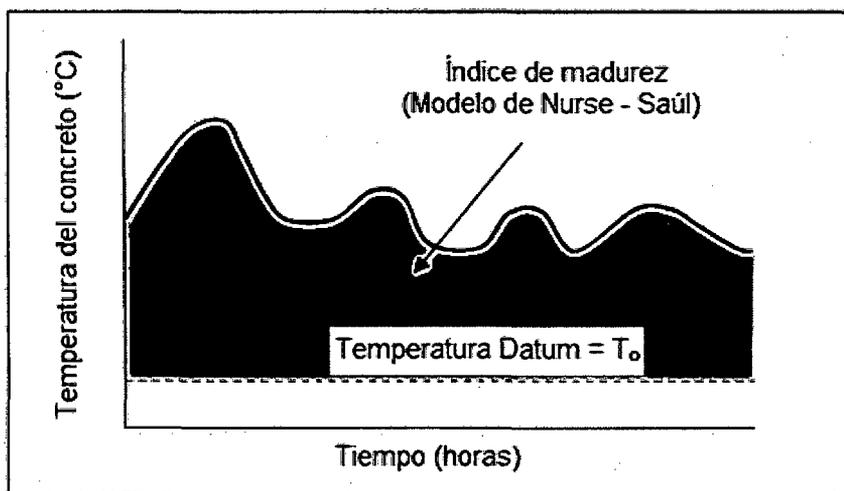


Figura 3.2: Concepto gráfico del modelo de Nurse-Saul.

Uno de los aportes más importantes que ha dado este modelo es la ley propuesta por Saúl, la cual menciona que *“concretos de la misma mezcla con la misma madurez, medido usando el factor temperatura - tiempo, tendrá aproximadamente la misma resistencia, sin importar la combinación de temperatura y tiempo que dio como resultado esa madurez”*

Esta ley es uno de los principios básicos del método de madurez, esto implica que, para una mezcla de concreto, con tal que la madurez corresponda a la resistencia particular establecida. Uno puede estimar cuando el concreto ha alcanzado dicha

resistencia, incluso si el concreto en estudio tiene diferente historial de curado que el concreto original. Esto mismo se puede visualizar en la figura 3.3.

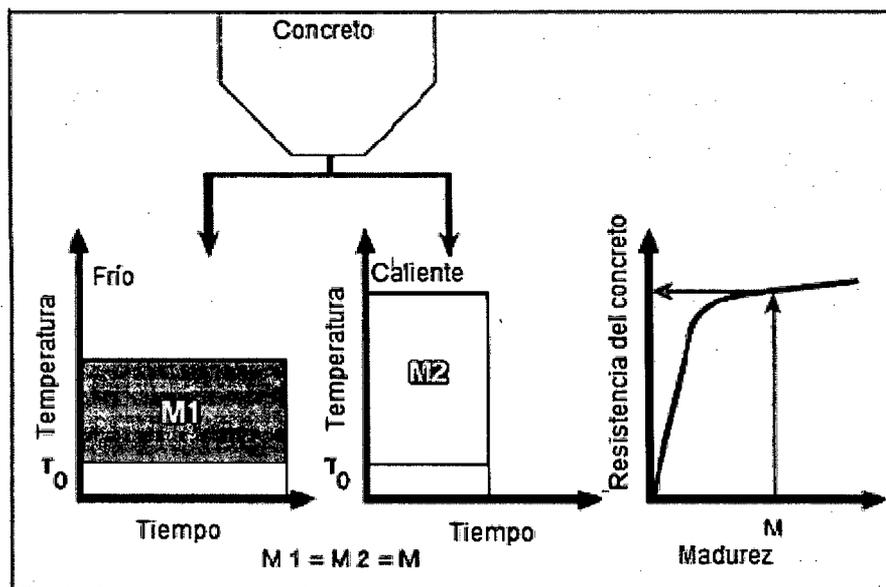


Figura 3.3: Visualización esquemática de la ley de Saúl.

3.2.2. Modelo de Rastrup

En 1954, Rastrup propuso el concepto de "edad equivalente" como una alternativa para representar los efectos combinados de temperatura y tiempo. Este nuevo concepto fue definido como el tiempo que el concreto debería estar curado a una temperatura constante T_r , para alcanzar la misma madurez que el concreto sometido al actual historial de curado. Matemáticamente, su expresión fue dada de la siguiente forma:

$$t_{eq} = \frac{\sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t}{T_r - T_0}$$

Donde:

t_{eq} : Edad equivalente (horas).

T : Temperatura promedio del concreto en el intervalo Δt (°C).

T_0 : Temperatura datum (°C).

T_r : Temperatura de curado constante bajo la cual se espera alcanzar la misma madurez que el historial de temperatura del concreto bajo investigación (°C).

t : Tiempo del proceso de endurecimiento del concreto (horas o días).

Si bien es cierto que esta función fue propuesta con la finalidad de obtener mejores resultados con respecto a la función de Nurse - Saúl, esta no dio los resultados esperados. Sin embargo, el concepto de edad equivalente propuesto por Rastrup sería utilizado en otra función que apareció a fines de los 70.

3.2.3. Modelo de Arrhenius

En el año de 1977, Freisleben Hansen y Pedersen propusieron un nuevo modelo para calcular la madurez del concreto, este modelo se fundamenta en la ecuación de Arrhenius, la cual se utiliza para describir el efecto de la temperatura en el índice de una reacción química, y también el concepto propuesto por Rastrup, edad equivalente, con diferencia que su nueva función matemática era de la siguiente forma:

$$t_{eq} = \sum_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)} \cdot \Delta t$$

Donde:

t_{eq} : Edad equivalente (horas).

T: Temperatura promedio del concreto en el intervalo Δt (°C).

T_r : Temperatura de curado constante bajo la cual se espera alcanzar la misma madurez que el historial de temperatura del concreto bajo investigación (°C).

e: Número de Euler ($\approx 2,718$).

E_a : Energía aparente de activación (J/mol).

R: Constante de los gases (8.314 J/mol K).

El concepto de energía aparente de activación es muy similar al de temperatura datum, es decir la energía aparente de activación significa la mínima energía que se requiere para empezar el proceso de endurecimiento del concreto. Para poder determinarla, Freisleben Hansen y Pedersen recomendaron usar las siguientes ecuaciones:

$$E_a = 33500 + 1470 \cdot (20 - T_c) \text{ J/mol, para } T_c < 20^\circ\text{C}$$

$$E_a = 33500 \text{ J/mol, para } T_c \geq 20^\circ\text{C}$$

Donde:

E_a : Energía aparente de activación (J/mol).

T_c : Temperatura de curado del concreto (°C).

Una vez propuesta esta función, se realizaron estudios comparativos con la función de Nurse-Saúl, los cuales concluían que la función de Arrhenius generaba mejores resultados que las del factor de temperatura y tiempo, en cuanto a la precisión de ambos modelos. Sin embargo, esta nueva función no podía explicar los efectos de la temperatura a edad temprana en las resistencias últimas, lo que hoy en día se conoce como el efecto "cross-over", dicho punto es, hasta el día de hoy, una limitación inherente del método de madurez.

3.2.4. Modelo holandés

También conocido como la madurez ponderada, fue propuesto por Papadakis y Bresson en 1979, matemáticamente la madurez ponderada puede ser expresada de la siguiente manera:

$$M_w = \sum_0^t t_k \cdot T_k \cdot C^{n_k}$$

Donde:

M_w : Madurez ponderada (°C-hr).

t_k : Tiempo de endurecimiento del concreto correspondiente al $(T_i - T_j) / 2$ (horas).

T_k : Intervalo de temperatura en el proceso de endurecimiento $(T_i - T_j)$ (°C).

C : Valor constante que depende del tipo de cemento.

n_k : Parámetro dependiente de la temperatura para un respectivo T_k .

Esta ecuación puede verse en la figura 3.4, en la cual para un historial de temperatura de concreto dado, con un tipo de cemento ensayado, el área bajo la curva temperatura vs tiempo puede ser subdividida en varias franjas horizontales, denominadas intervalos de temperatura en el proceso de endurecimiento (T_k). El área de cada franja puede calcularse como $t_k \times T_k$, donde t_k es el tiempo correspondiente a $(T_i - T_j) / 2$, de una manera similar a la del modelo Nurse - Saúl, pero la diferencia radica en que

este nuevo modelo toma en cuenta los factores C y n_k que corresponden a la influencia del cemento en la madurez y la influencia del tipo de cemento utilizado respectivamente.

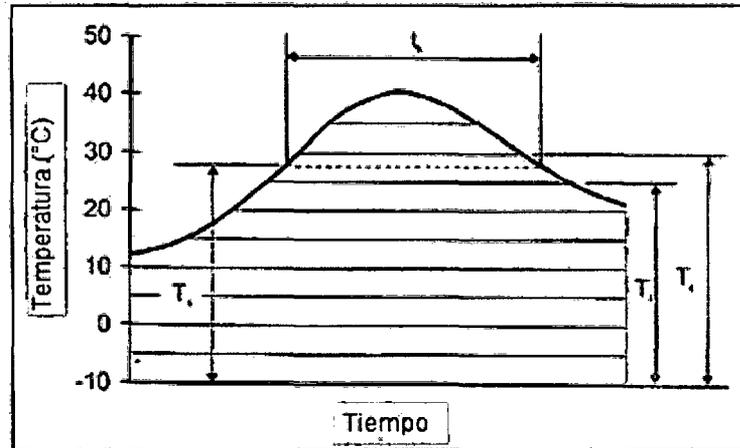


Figura 3.4: Concepto de madurez ponderada.

Los valores a usar de n_k y C han sido estandarizados por investigaciones holandesas, y pueden ser visualizados en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1: Valores de "n" correspondiente a los T_k , Betoniek 1984

Intervalo de temperatura, T_k , °C		n
Desde	Hasta	
-10	-5	-2.0
-5	0	-1.5
0	5	-1.0
5	10	-0.5
10	15	0.0
15	20	0.5
20	25	1.0
25	30	1.5
30	35	2.0
35	40	2.5
40	45	3.0
45	50	3.5
50	55	4.0
55	60	4.5
60	65	5.0
65	70	5.5

70	75	6.0
75	80	6.5
80	85	7.0
85	90	7.5
90	95	8.0

Fuente: Final Report RILEM TC 185 – ATC, Ningxu Han, 2005.

Tabla 3.2: Ejemplo de madurez ponderada, CUR 1986.

Temperatura (T _k)	Valor de C										
	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75
5	10.8	10.2	9.6	9.1	8.7	8.3	7.9	7.5	7.2	6.9	6.6
6	11.7	11.1	10.5	10.0	9.5	9.1	8.7	8.3	8.0	7.7	7.4
7	12.6	11.9	11.4	10.8	10.4	9.9	9.5	9.1	8.8	8.5	8.2
8	13.5	12.8	12.2	11.7	11.2	10.7	10.3	9.9	9.6	9.2	8.9
9	14.4	13.7	13.1	12.5	12.0	11.5	11.1	10.7	10.3	10.0	9.7
10	15.2	14.6	13.9	13.4	12.8	12.4	11.9	11.5	11.1	10.8	10.4
11	16.2	15.6	14.9	14.4	13.8	13.4	12.9	12.5	12.1	11.8	11.4
12	17.2	16.6	15.9	15.4	14.8	14.4	13.9	13.5	13.1	12.8	12.4
13	18.2	17.6	16.9	16.4	15.8	15.4	14.9	14.5	14.1	13.8	13.4
14	19.2	18.6	17.9	17.4	16.8	16.4	15.9	15.5	15.1	14.8	14.4
15	20.2	19.6	18.9	18.4	17.8	17.4	16.9	16.5	16.1	15.8	15.4
16	21.4	20.7	20.1	19.5	19.0	18.6	18.2	17.8	17.4	17.1	16.8
17	22.5	21.8	21.3	20.7	20.3	19.8	19.4	19.0	18.7	18.4	18.1
18	23.6	23.0	22.4	21.9	21.5	21.0	20.6	20.3	20.0	19.7	19.4
19	24.7	24.1	23.6	23.1	22.7	22.3	21.9	21.6	21.3	21.0	20.7
20	25.8	25.3	24.7	24.3	23.9	23.5	23.1	22.8	22.5	22.3	22.0
21	27.1	26.6	26.1	25.7	25.3	25.0	24.7	24.4	24.2	24.0	23.8
22	28.3	27.9	27.4	27.1	26.8	26.5	26.2	26.0	25.8	25.7	25.5
23	29.6	29.2	28.8	28.5	28.2	28.0	27.8	27.6	27.5	27.4	27.3
24	30.8	30.5	30.1	29.9	29.7	29.5	29.3	29.2	29.1	29.1	29.0
25	32.1	31.8	31.5	31.3	31.1	31.0	30.9	30.8	30.8	30.8	30.8
26	33.5	33.2	33.1	32.9	32.9	32.8	32.8	32.8	32.9	33.0	33.1
27	34.9	34.7	34.6	34.6	34.6	34.7	34.7	34.9	35.0	35.2	35.4
28	36.3	36.2	36.2	36.3	36.4	36.5	36.7	36.9	37.1	37.4	37.7
29	37.7	37.7	37.8	37.9	38.1	38.3	38.6	38.9	39.3	39.6	40.1
30	39.1	39.2	39.3	39.6	39.8	40.2	40.5	40.9	41.4	41.9	42.4

Fuente: Final Report RILEM TC 185 – ATC, Ningxu Han, 2005.

3.2.5. Modelo de Guo

Guo en el año de 1989 propuso un modelo cuadrático para determinar la madurez del concreto, su expresión matemática fue:

$$M_g = \sum_0^t (T + 10) \cdot (T + 20) \cdot \Delta t$$

Donde:

M_g : Madurez propuesto por Guo.

t: Tiempo del proceso de endurecimiento del concreto (horas o días).

T: Temperatura promedio del concreto en el intervalo de tiempo Δt .

3.3. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO A PARTIR DEL CONOCIMIENTO DE SU MADUREZ

Una vez que se conoce los diferentes modelos para poder determinar la madurez del concreto, se tendrá que saber cómo estimar la resistencia del concreto a partir del conocimiento de su madurez, fundamentalmente se basa en la ley de Saúl y en los siguientes pasos.

3.3.1. Curva madurez vs. resistencia

Para poder hacer uso del método de madurez es fundamental establecer la famosa curva llamada "madurez vs resistencia", en base a esta curva patrón se podrá realizar estimaciones de la resistencia a la compresión del concreto.

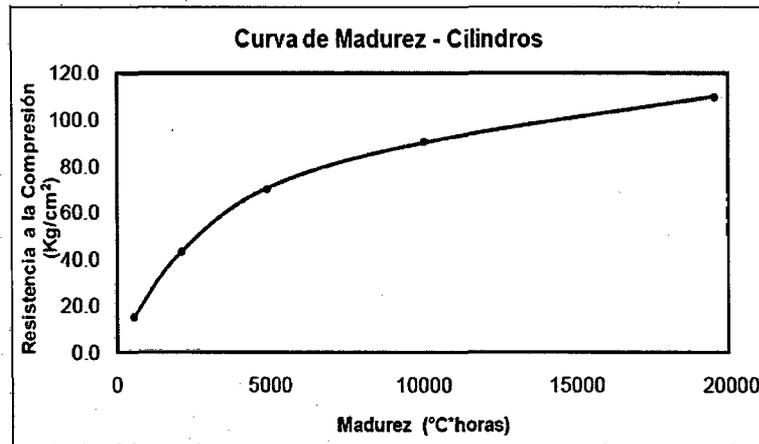


Figura 3.5: Curva madurez vs. resistencia.

Por medio de ensayos experimentales se puede obtener la madurez y resistencia a la compresión del concreto, y representarlos como se muestra en la figura 3.5, cabe destacar que esta curva es única y solamente única para cada diseño, y además que la forma de trazar esta curva será vista en el siguiente punto.

3.3.2. Modelos para la curva madurez vs. resistencia

Existen varias funciones que fueron propuestas para poder modelar la curva madurez vs. resistencia, sin embargo solamente 3 son típicamente usadas. De acuerdo con la publicación realizada por Carino en 1991, *The Maturity Method. In Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, se tienen las siguientes curvas:

3.3.2.1. Función exponencial

Su ecuación es de la siguiente forma:

$$S = S_u \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^x}$$

Donde:

S: Resistencia a la compresión para una madurez M (kg/cm²)

S_u: Resistencia a la compresión limite (kg/cm²)

M: Madurez o índice de madurez (°C-hr o hr)

τ: Constante característica (°C-hr o hr)

x: Parámetro de forma.

3.3.2.2. Función logarítmica

Tiene como ecuación:

$$S = a + b \log(M)$$

Donde:

S: Resistencia a la compresión para una madurez M (kg/cm²)

M: Madurez o índice de madurez (°C-hr o hr)

a y b: Constantes dependientes de la mezcla.

3.3.2.3. Función hiperbólica

Su expresión es de la siguiente forma:

$$S = S_u \cdot \frac{k \cdot (M - M_o)}{1 + k \cdot (M - M_o)}$$

Donde:

S: Resistencia a la compresión para una madurez M (kg/cm²)

S_u: Resistencia a la compresión límite (kg/cm²)

M: Madurez o índice de madurez (°C-hr o hr)

M_o: Índice de madurez cuando se asume que la resistencia empieza a desarrollarse (°C-hr o hr)

k: Pendiente inicial de la curva madurez vs resistencia (1/(°C-hr) o 1/hr)

A fin de determinar cuál función describe mejor la ganancia de resistencia del concreto, Carino ajusto las fórmulas para unos datos de resistencia a la compresión obtenidos de una mezcla con cemento tipo I y relación agua/ cemento de 0.45 curado a 23° C. Sus resultados son mostrados en la figura 3.6.

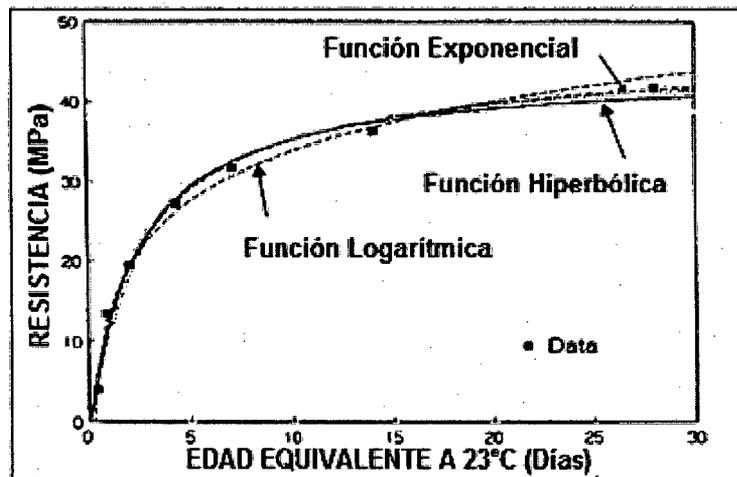


Figura 3.6: Resultados de los ensayos realizados por Carino.

De la anterior figura puede apreciarse que las funciones exponenciales e hiperbólicas producen casi las mismas curvas, con una ligera variación en los resultados a edades últimas. Estas dos ecuaciones ajustan muy bien la data, mientras que la función logarítmica levemente sobreestima la resistencia a la edad de 5 días, y además muestra que la resistencia siempre incrementará si también lo hace su madurez.

Un punto importante a detallar es que la norma de madurez no especifica qué tipo de modelo usar para la curva madurez vs. resistencia, es decir el usuario puede usar cualquiera de los 3 modelos; el procedimiento del desarrollo de esta curva será visto en el siguiente ítem, el cual consiste en la normativa del método de madurez del concreto.

3.4. NORMATIVA DEL MÉTODO DE MADUREZ DEL CONCRETO –ASTM C 1074

Actualmente, la norma que rige este método es la ASTM C1074, “*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*”, cuya última versión es la del 2011. En nuestro medio, esta misma norma se describe en la NTP.339.217, “*Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez*”, pero esta última se encuentra en la versión 2007. Por tal razón, para detallar los puntos de la normativa de la madurez del concreto, se utilizará

la publicada en el 2011 ya que incluye más información respecto a la curva de ajuste del método de madurez.

3.4.1. Resumen de la normativa del método de madurez

- Primeramente, como ya se hizo mención, una curva madurez-resistencia debe ser desarrollada realizando ensayos en un laboratorio, sobre la mezcla de concreto que se utilizará.
- El historial de temperatura del concreto en obra, para el cual se quiere estimar su resistencia, será registrado desde el tiempo que el concreto es vaciado hasta el tiempo en el que se requiera la resistencia deseada o afines.
- El historial de temperatura registrado es usado para calcular el índice de madurez, usando el modelo de Nurse-Saúl o el modelo de Arrhenius, del concreto en obra.
- Usando el índice de madurez calculado y la curva madurez-resistencia establecida, la resistencia del concreto en obra es estimada.

3.4.2. Ventajas y limitaciones del método de madurez

3.4.2.1. Ventajas de usar la madurez del concreto

Este método puede ser usado, principalmente, para estimar la resistencia a la compresión del concreto utilizado en obra, la cual permite el inicio de actividades de construcción críticas tales como:

- ✓ Remover el encofrado de un elemento de concreto.
- ✓ Apuntalar y reapuntalar.
- ✓ Post- tensado de tendones en un elemento de concreto.
- ✓ Finalización de la protección de una losa o pavimento en climas fríos.
- ✓ Apertura del pavimento para el tráfico.

En base a lo escrito anteriormente, se puede ver que el método de madurez permite conocer el tiempo necesario para poder realizar este tipo de actividades, y además

que su aplicabilidad también puede darse en pavimentos rígidos. En la figura 3.7 se muestra una de las tantas aplicaciones del método de madurez del concreto.

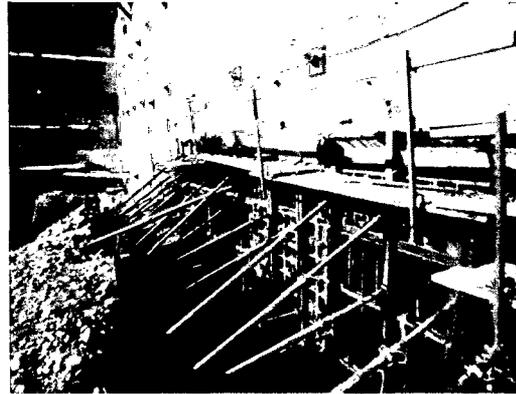


Figura 3.7: Aplicación del método de madurez en muros anclados.

3.4.2.2. Limitaciones del método de madurez del concreto

Las principales limitaciones de este método son:

- El concreto debe estar mantenido en condiciones que permita la hidratación del cemento.
- El método no toma en cuenta los efectos de la temperatura del concreto en edades iniciales para la resistencia última, es decir se ve afectada por el efecto "cross - over", véase figura 3.8.
- El método necesita ser apoyado por otros ensayos para la obtención de la resistencia del concreto.
- El método, como cualquier otro, no toma en cuenta malas prácticas constructivas en el concreto.

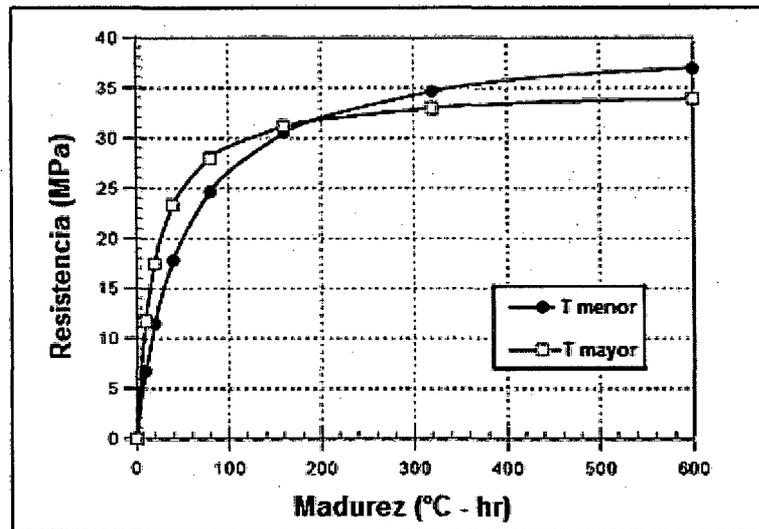


Figura 3.8: El efecto "cross - over" en la resistencia del concreto

3.4.2.3. Requisitos de los equipos para medir la madurez del concreto

Los siguientes puntos describirán los requisitos necesarios que debe reunir un equipo para poder realizar la lectura de la madurez del concreto, más no se habla de un equipo específico, este punto se detallará en el punto 3.5.

- El equipo a requerirse tendrá que ser capaz de monitorear y grabar la temperatura del concreto, para luego poder calcular la madurez del concreto usando el modelo de Nurse - Saúl o el modelo de Arrhenius.
- Los equipos, que son mayormente usados, incluyen sensores de temperatura conectados a unos registradores, data - loggers, o dispositivos digitales embebidos en el concreto.
- El intervalo de tiempo de las mediciones de temperatura deberá ser $\frac{1}{2}$ hr o menos para las primeras 48 hrs y una hora o menos después de las primeras 48hrs. Es suficiente con que el equipo tenga precisión al décimo, $\pm 1^\circ\text{C}$, para poder realizar las lecturas.

3.4.2.4. Procedimiento para desarrollar la curva madurez - resistencia

Para desarrollar la curva madurez - resistencia se realizan los siguientes pasos:

- Primeramente, se prepara por lo menos 15 especímenes de acuerdo con la norma NTP 339.183, "*Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio*", las proporciones y componentes de la mezcla deberán ser similares al concreto que se pretende estimar su resistencia a la compresión.
- Se embeben los sensores de temperatura dentro de ± 15 mm del centro de los últimos dos especímenes, así, inmediatamente se conecta los sensores con los aparatos o instrumentos, con el fin de registrar la temperatura alcanzada por el concreto.
- Los cilindros son curados en una poza de curado o un cuarto húmedo que cumpla los requerimientos de la NTP 339.033, "*Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en campo.*"
- Si no se menciona sobre el día del ensayo, la norma sugiere ensayar a la edad de 1, 3, 7, 14, 28 días de acuerdo a la NTP 339.034, "*Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas*".
- A cada edad de ensayo, registrar la madurez del espécimen.
- Colocar los resultados obtenidos por medio de pares ordenados, de tal manera que la 1era componente sea la madurez del concreto, mientras que la 2da componente sea la resistencia promedio del concreto con la respectiva edad de ensayo, las figuras 3.9 y 3.10 muestran ejemplos de lo anteriormente mencionado. Para ajustar estos pares ordenados en una curva, usar cualquiera de los tres modelos de Carino, véase figura 3.6, de preferencia el que mejor se ajuste.

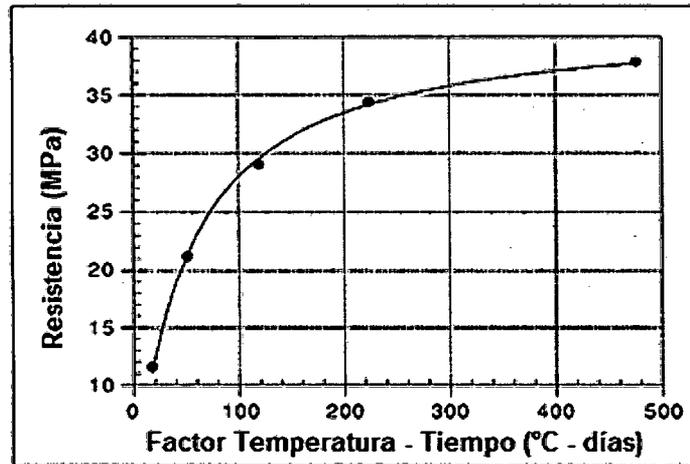


Figura 3.9: Curva madurez - resistencia según modelo de Nurse - Saúl.

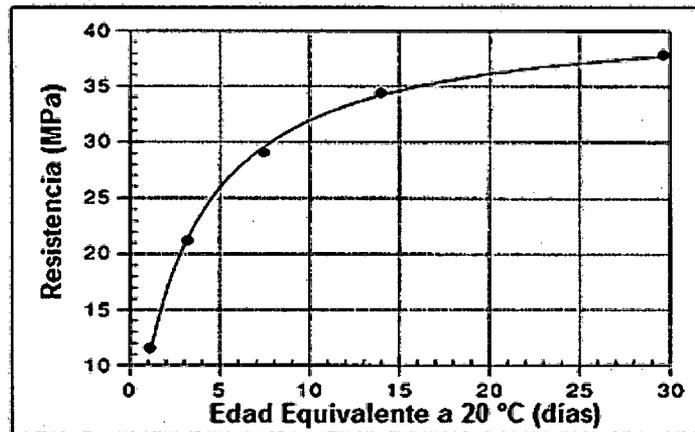


Figura 3.10: Curva madurez - resistencia según modelo de Arrhenius.

3.4.2.5. Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión del concreto a partir de su madurez

Para poder estimar la resistencia a la compresión del concreto a partir del conocimiento de su madurez, se realizarán los siguientes pasos:

- Colocar y asegurar los sensores dentro de la sección a realizarse el vaciado de concreto, o embeber los sensores de temperatura dentro del concreto fresco tan pronto sea conveniente después del vaciado.

- Conectar los sensores a los instrumentos de madurez o aparatos que registren la temperatura del concreto tan pronto haya sido vaciado el concreto. Se recomienda usar el mismo valor de temperatura datum o energía de activación que se usó en la elaboración de la curva madurez - resistencia, y por supuesto usar el mismo modelo con que se calculó la madurez.
- Cuando se requiera estimar la resistencia del elemento de concreto en estudio, leer el valor actual del índice de madurez entregado por el equipo utilizado.
- Usando la curva madurez - resistencia desarrollada, leer el valor correspondiente de la resistencia a la compresión que genera ese índice de madurez, dicho valor será la resistencia de ese elemento. Por términos de seguridad, la norma recomienda usar algún otro método que permita estimar la resistencia potencial del elemento.
- Las resistencias determinadas por medio de las probetas cilíndricas del elemento, son comparadas con las resistencias estimadas por la curva madurez-resistencia. Si la diferencia supera consistentemente el 10%, una nueva curva madurez-resistencia será necesitada, véase figura 3.11.
- En la figura 3.11, la línea roja representa la curva madurez – resistencia realizada experimentalmente, mientras que las dos líneas azules representan el límite inferior de -10 % y el límite superior de + 10%, dichos porcentajes están comparados con los valores generados por la línea roja.

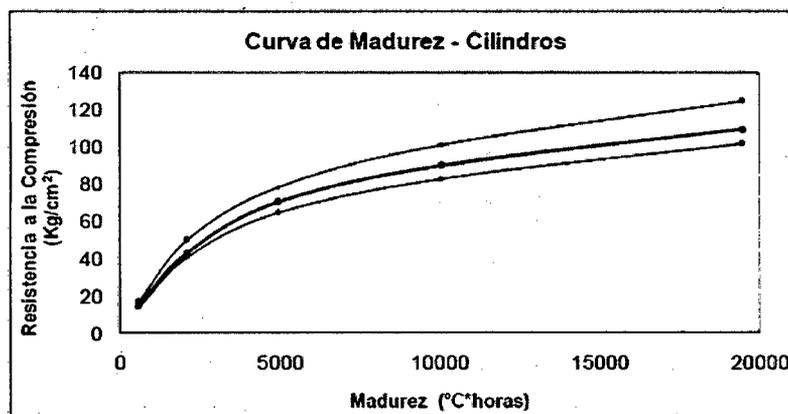


Figura 3.11: Límites válidos de la curva madurez - resistencia para la predicción de la resistencia del concreto en un elemento.

3.4.2.6. Precisión del método de madurez del concreto

La norma ASTM C 1074 menciona lo siguiente: *“La precisión de la resistencia estimada depende de varios factores, como la apropiada elección de la función madurez para una mezcla específica, el historial de temperatura en edades tempranas, las proporciones actuales de la mezcla. Por tal razón, no es posible escribir algo específico respecto a la precisión de la resistencia estimada”*.

En vista de esta aclaración, justamente esta tesis pretende conocer la precisión de este método para una respectiva mezcla diseñada.

3.5. EQUIPOS PARA MEDICIÓN DE LA MADUREZ DEL CONCRETO

A diferencia de los años en que surgió el método de madurez, cuando no se tenía la facilidad de un equipo que pueda medir la madurez, actualmente existe una variabilidad de ellos, ya sea si estos trabajan bajo el modelo de Nurse-Saúl o el modelo de Arrhenius.

Los equipos de medición de madurez han evolucionado desde sistemas manuales simples, sistemas electrónicos complejos hasta microelectrónicos avanzados, existiendo actualmente una variedad de equipos, que proporcionan a la vez variabilidad en el grado de exactitud, automatización, seguridad, e integridad de los datos. Estos equipos se dividen en dos generaciones distintas, la distinción entre los equipos de la primera y segunda generación es la discrepancia en el registro de datos y la tecnología de almacenaje. Más específicamente, la distinción difiere en la localización de donde se registran y se almacenan los datos.

Todos los equipos de primera generación almacenan los datos externamente a la estructura que se está supervisando, en cambio los equipos de segunda generación almacenan todos los datos de temperatura y/o madurez dentro del concreto mismo, esto protege los datos ya que los guarda en una memoria interna.

3.5.1. Primera generación de equipos de medición de madurez

La primera generación de equipos de madurez se agrupa en tres categorías, las cuales son:

3.5.1.1. Método manual

Como su mismo nombre lo indica, se caracteriza por realizar las mediciones de manera manual como se aprecia en la figura 3.12.

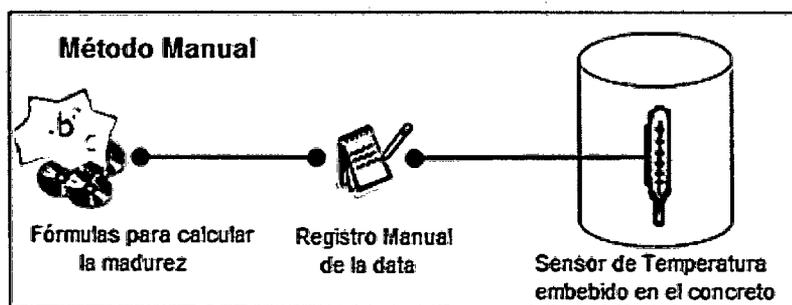


Figura 3.12: Método manual para la determinación de la madurez.

3.5.1.2. Colector de datos externos

A diferencia del anterior, este se caracteriza porque las mediciones son realizadas por un equipo que está constantemente conectado con el concreto y registrando los datos para luego ser procesados en una pc, véase figura 3.13.

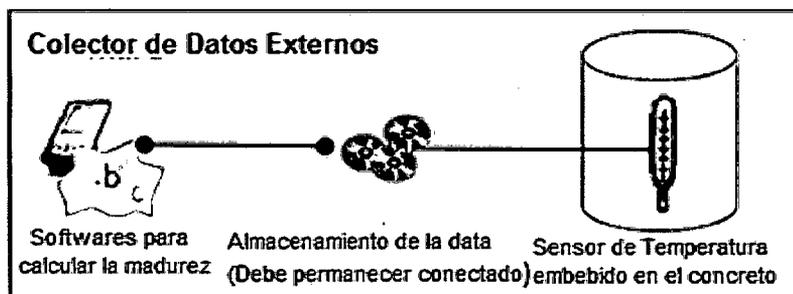


Figura 3.13: Ejemplo de un colector de datos externos.

3.5.1.3. Mecanismo de cálculo externo de madurez

La figura 3.14 muestra un ejemplo de este equipo, como se puede ver, es muy similar al colector de datos externos, pero la diferencia radica en que ya no es necesario un equipo intermediario, ya que está conectado directamente a una pc.

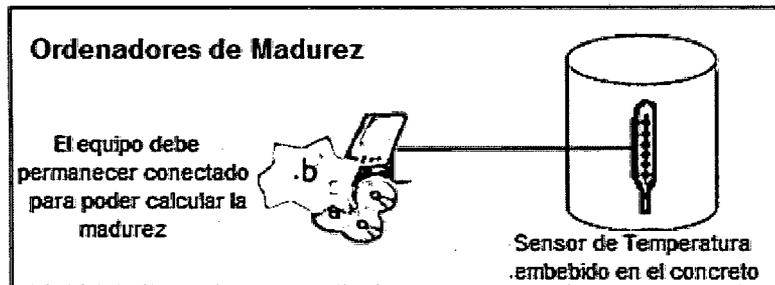


Figura 3.14: Mecanismo de cálculo externo de madurez

Algunos ejemplos de estos equipos, véase figura 3.15, serían los termómetros analógicos y/o digitales, termómetros electrónicos, cajas registradoras (data-loggers), etc.



Figura 3.15: Ejemplo de caja registradora y un termómetro electrónico en el lado izquierdo y derecho respectivamente.

3.5.2. Segunda generación de equipos de medición de madurez

Los equipos de madurez de segunda generación representan un cambio importante en la tecnología para determinar la madurez del concreto. La distinción principal con

los equipos de primera generación difiere en su confianza sobre la tecnología de registros de datos integrados.

Esta tecnología permite a los equipos de segunda generación proporcionar en campo en cualquier momento lecturas reales de madurez sin la necesidad de dispositivos externos colocados permanentemente. Los equipos de segunda generación de madurez se pueden agrupar en las dos categorías siguientes:

3.5.2.1. Colector de datos internos

Se caracteriza por usar un equipo que registra los datos a través de una memoria interna, y que solo se conecta cuando sea necesario realizar la medición, como se observa en la figura 3.16.

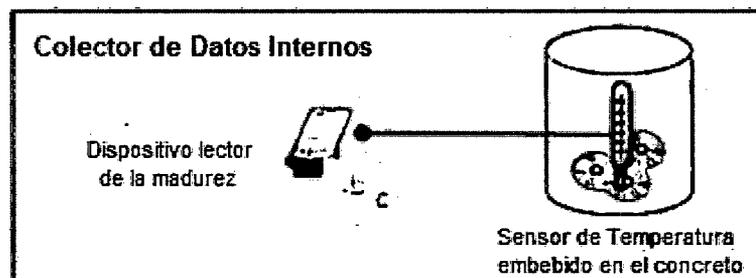


Figura 3.16: Colector interno de datos para la medición de la madurez.

3.5.2.2. Colector de datos internos vía inalámbrica.

En la figura 3.17 se observa cómo funciona este equipo, que tiene la capacidad de poder comunicarse con el sensor de manera inalámbrica.

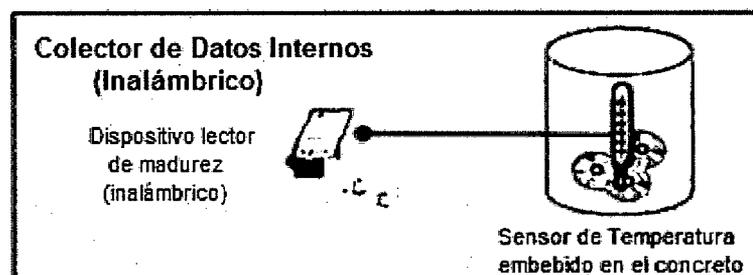


Figura 3.17: Mecanismo de trabajo del colector vía inalámbrica.

Actualmente, diversas empresas se encargan de la fabricación de equipos de segunda generación, por ejemplo tenemos a la empresa ENGIUS, CON-CURE, COMMAND CENTER, entre otras. En la figura 3.18, se observa un ejemplo de un colector de datos internos.



Figura 3.18: Ejemplo de un equipo de segunda generación.

3.6. PROYECTOS INTERNACIONALES QUE HAYAN APLICADO EL MÉTODO DE MADUREZ

En esta sección se mencionará algunos proyectos que utilizaron el método de madurez del concreto durante su construcción, y así como también los beneficios que generó su implementación. Se empezará con proyectos norteamericanos y luego con sudamericanos.

3.6.1. Proyecto de construcción comercial en Frisco, Texas

Consistió en un proyecto de 8 niveles, de los cuales 2 son usados como estacionamiento, como se aprecia en la figura 3.19, los datos obtenidos por el método de madurez permitieron realizar las operaciones de post tensado después de 33 horas de iniciar la construcción, mucho tiempo antes que el obtenido en las probetas de control.

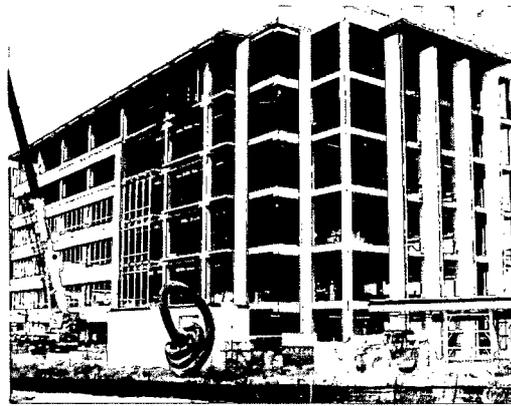


Figura 3.19: Construcción comercial en Frisco, Texas, USA

3.6.2. Proyecto de intercambio vial “Dallas High Five”, Texas

En este proyecto gracias al uso del método de madurez se pudo completar el 38% de la obra tan sólo en 18 meses, y además la empresa constructora, *Zarchy Construction Corporation*, recibió un bono de \$11 millones debido a la terminación temprana del mismo proyecto. La figura 3.20 muestra una vista de este proyecto.

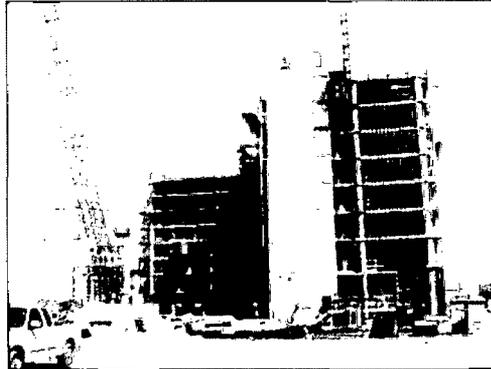


Figura 3.20: Proyecto de intercambio vial “Dallas High Five”, Texas, USA.

3.6.3. Proyecto Marriott Courtyard, Oklahoma.

La empresa Flintco Inc fue la encargada de construir este proyecto de 8 pisos en Oklahoma, durante su construcción, se hizo uso del método de madurez para optimizar el postensado de las losas y además para conocer el perfil térmico del concreto durante los meses de clima frío, la ventaja generada por el método de

madurez fue que permitió rotar el encofrado en 2 o 3 días, mientras que las probetas de control les permitía realizar esta operación entre 5 a 7 días. En la figura 3.21 se puede apreciar la construcción de este proyecto en Oklahoma.



**Figura 3.21: Proyecto de construcción Marriott Courtyad,
Oklahoma,USA.**

3.6.4. Proyecto de reparación del túnel Chingaza, Bogotá

La aplicación del método de madurez en este proyecto fue al falso túnel de concreto, véase figura 3.22, era importante conocer cuando el concreto llegaría a 40 Kg/cm². Por el método de las probetas cilíndricas, esto se lograba a la edad de 18 horas, mientras que esto mismo por el método de madurez se lograba entre las 9.3 horas y 14 horas.



**Figura 3.22: Proyecto de reparación del túnel Chingaza, Bogotá,
Colombia.**

CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN PROBETAS

A partir de este capítulo se verá la parte experimental realizada en esta investigación, en primer lugar se describirá las características de los materiales estudiados, después se verá el diseño de mezcla experimentado y finalmente los resultados de los ensayos utilizando los métodos estandarizados descritos en el capítulo II.

4.1. MATERIALES UTILIZADOS

Como toda mezcla de concreto, los materiales que lo componen son el cemento, agregado fino, agregado grueso, agua, aire y aditivos. A continuación se verá las características de los materiales empleados en esta investigación.

4.1.1. Cemento

El cemento utilizado fue portland tipo I de la marca "Sol", véase figura 4.1, que cumple con la NTP 334.009 - ASTM C 150, "Cementos Portland. Requisitos". Este tipo de cemento hidráulico es utilizado para construcciones que no demandan características especiales para el concreto.



Figura 4.1: Cemento Sol portland tipo I

Comercialmente es presentado en bolsas de 42,5 kg constituido por 3 pliegos que tienen como función básica proteger al cemento. Al tratarse de un cemento tipo Portland, se considerará un peso específico igual a 3.15 valor numérico que será empleado en el diseño de mezcla.

Este tipo de cemento puede ser empleado en pavimentos, pisos, edificios de concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado.

4.1.2. Agregados

Existen dos tipos de agregados: agregado grueso y agregado fino. El agregado fino se define como aquel material proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, el cual pasa el tamiz de 3/8" (9.4mm) y cumplen con los límites establecidos en las normas NTP 400.037 - ASTM C 33, *"Especificaciones normalizadas para agregados en concreto."*

El agregado fino podrá consistir de arena natural o manufacturada o una combinación de ambas, sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duras, compactas y resistentes, libres de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas para el concreto.

Mientras que el agregado grueso se define como al material retenido en el tamiz N°4, que cumple con los límites establecidos en las normas NTP 400.037 - ASTM C 33.

El agregado grueso podrá consistir de piedra partida, grava natural o triturada, agregados metálicos naturales o artificiales, concreto triturado, o una combinación de ellos. Estará conformado por partículas cuyo perfil debe ser preferentemente angular o semiangular, limpias, duras, compactas, resistentes, de textura preferentemente rugosa y libre de material escamoso o partículas blandas. Las partículas deberán ser químicamente estables y estarán libres de escamas, tierra, polvo, limo, sales, humus, incrustaciones superficiales, materia orgánica, u otras sustancias dañinas.

Los agregados generalmente ocupan la mayor cantidad de volumen en el concreto y por lo tanto influyen profundamente en su desempeño, tanto en estado fresco como endurecido. Una adecuada selección de agregados es importante para todos los concretos estructurales.

Los agregados empleados en esta investigación provienen de la cantera de Jicamarca, UNICON.

4.1.2.1. Análisis granulométrico

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado. Es determinado a través de un análisis con tamices según la ASTM C136 - NTP 400.012, "Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global." Los tamaños de las partículas se determinan con los diferentes tamaños de los tamices que en el caso de los agregados finos son 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100, mientras que para los agregados gruesos son 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100.

Los resultados de los análisis son usados para determinar si los materiales cumplen con las especificaciones; seleccionar el material más adecuado en caso de haber varios agregados disponibles y detectar variaciones en la granulometría que son suficientes para justificar la mezcla de tamaños seleccionados o un ajuste de las proporciones de la mezcla de concreto.

En el caso que los agregados no cumplan con los requisitos propuestos por la ASTM C136 - NTP 400.012, estos deberán ser sometidos a un tratamiento o mejoramiento, por ejemplo un lavado y secado de estos con el fin de disminuir los materiales finos.

La tabla 4.1 muestra los resultados del análisis granulométrico para el caso del agregado fino.

Tabla 4.1: Análisis granulométrico para el agregado fino

TAMIZ (mm)	% RET	% RET. ACUM	% PASA
9.5 (3/8")	0.0	0.0	100.0
4.75 (N°4)	1.9	1.9	98.1
2.38 (N°8)	12.9	14.8	85.2
1.19 (N°16)	24.9	39.7	60.3
0.6 (N°30)	20.8	60.5	39.5
0.3 (N°50)	18.2	78.7	21.3
0.15 (N°100)	12.5	91.3	8.7

0.075 (N°200)	8.7	100.0	0.0
---------------	-----	-------	-----

Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales - LEM - UNI.

De acuerdo a los requisitos granulométricos proporcionados por la NTP 400.037 - ASTM C 33, el agregado fino es del tipo C. Esto puede apreciarse en la figura 4.2.

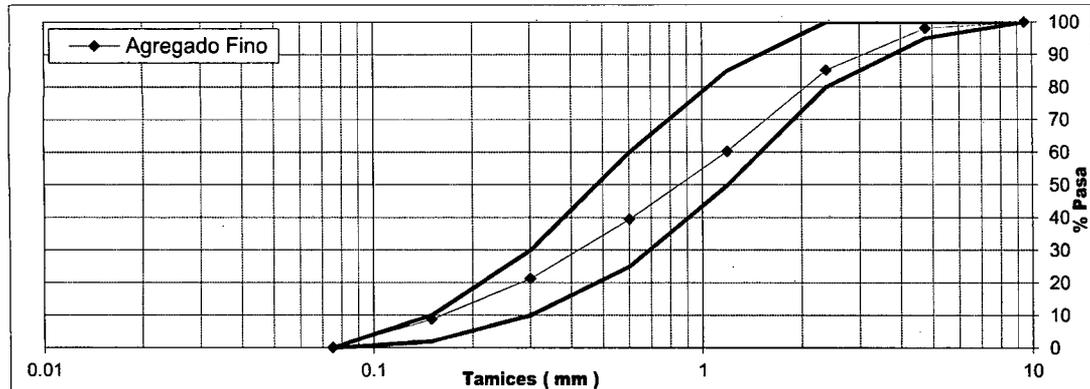


Figura 4.2: Análisis Granulométrico para el agregado fino.

La tabla 4.2 muestra los resultados del análisis granulométrico para el caso del agregado grueso.

Tabla 4.2: Análisis granulométrico para el agregado grueso

TAMIZ (mm)	% RET.	% RET. ACUM	% PASA
63.5 (2 1/2")	0.0	0.0	100.0
50.8 (2")	0.0	0.0	100.0
38.1 (1 1/2")	0.0	0.0	100.0
25.4 (1")	0.0	0.0	100.0
19.05 (3/4")	0.5	0.5	99.5
12.7 (1/2")	36.9	37.4	62.6
9.5 (3/8")	23.9	61.3	38.7
4.75 (N°4)	34.1	95.4	4.6

2.38 (N°8)	3.3	98.7	1.3
1.18 (N°16)	0.5	99.2	0.8
9.6 (N°30)	0.2	99.4	0.6
0.2 (N°50)	0.1	99.5	0.5
0.15 (N°100)	0.1	99.6	0.4
0.075 (N°200)	0.4	100.0	0.0

Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales - LEM - UNI.

De acuerdo a los requisitos granulométricos proporcionados por la NTP 400.037 - ASTM C 33, el agregado grueso es de huso 67. Esto puede apreciarse gráficamente en la figura 4.3.

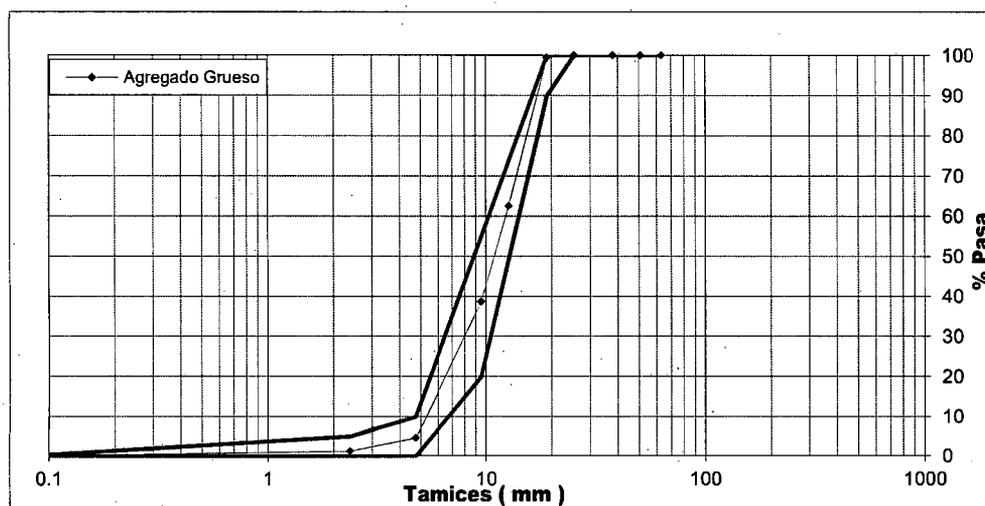


Figura 4.3: Análisis granulométrico para el agregado grueso.

4.1.2.2. Módulo de fineza (Norma NTP 400.012)

De acuerdo a la norma ASTM C136 - NTP 400.012, el módulo de fineza se calcula sumando el porcentaje acumulado retenido de material de cada uno de los siguientes tamices (porcentaje acumulado retenido) y dividir la suma entre 100: 150 μm (N° 100); 300 μm (N° 50); 600 μm (N° 30); 1,18 mm (N° 16); 2,36 mm (N° 8); 4,75 mm

(Nº 4); 9,5 mm (3/8 de pulgada); 19,0 mm (3/4 de pulgada); 37,5 mm (1 1/2 pulgada) y mayores; incrementando en la relación 2 a 1.

4.1.2.3. Absorción

La absorción se define como el incremento de peso de un agregado poroso seco, hasta lograr su condición de saturación con la superficie seca. Para el agregado grueso se calcula de acuerdo a la NTP 400.021 - ASTM C 127, "*Métodos de ensayo normalizado para el peso específico y absorción del agregado grueso*", mientras que para el agregado fino se calcula de acuerdo a la NTP 400.022 - ASTM C 128, "*Métodos de ensayo normalizado para el peso específico y absorción del agregado fino*",.

4.1.2.4. Humedad

La humedad se define como la cantidad de agua que contiene el agregado en un momento dado, se calcula de acuerdo a la norma ASTM C566 – NTP 339.185, "*Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.*"

Los conceptos de humedad y absorción se utilizan para calcular el agua de la mezcla en el concreto y además permite calcular las masas adecuadas que van a componer la mezcla.

4.1.2.5. Peso unitario y contenido de vacíos

El peso unitario de un agregado es la masa o peso del agregado necesario para poder llenar un determinado volumen de un recipiente. El volumen se refiere al ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas.

Para determinar estas propiedades se sigue las metodologías descritas en las normas ASTM C29 - NTP 400.017, "*Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado*".

4.1.2.6. Material que pasa la malla N°200

Grandes cantidades de arcilla y limo en agregados pueden afectar adversamente la durabilidad, aumentar la demanda de agua y aumentar la contracción (retracción) del

concreto. Las especificaciones normalmente limitan la cantidad de material que pasa por el tamiz N° 200 (75 μm) a 2% o 3% en el agregado fino y a 1% o menos en el agregado grueso. Las pruebas para el material más fino que 75 μm (tamiz N° 200) deben estar de acuerdo con las normas ASTM C 117 – NTP 400.018, “*Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 μm (N° 200) por lavado en agregados.*”

4.1.2.7. Gravedad específica

La gravedad específica de un agregado es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Es usado en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el agregado en el método del volumen absoluto de diseño de mezcla. Normalmente no se la usa como una medida de la calidad del agregado, aunque algunos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado por congelación-deshielo presentan baja gravedad específica.

Los métodos de ensayo para la determinación de la gravedad específica de los agregados fino y grueso se describen en las normas ASTM C 127 - NTP 400.021, “*Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado grueso.*”, La masa específica relativa de un agregado se puede determinar en la condición seca al horno o saturada con superficie seca.

4.1.2.8. Densidad

La densidad de las partículas que se usa en los cálculos de proporcionamiento, no incluyen los vacíos entre las partículas, se determina por la multiplicación de la gravedad específica relativa de los agregados por la densidad del agua. Se usa un valor para la densidad del agua de aproximadamente 1000 kg/m^3 . La masa específica del agregado, juntamente con valores más precisos de la densidad del agua, se presentan en las normas ASTM C 128 - NTP 400.022, “*Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado fino*”, la masa específica de las partículas de la mayoría de los agregados naturales está entre 2400 y 2900 kg/m^3 .

La tabla 4.3 muestra un resumen de las propiedades de los agregados empleados en esta tesis, estos datos serán utilizados para la elaboración del diseño de mezcla.

Tabla 4.3: Resumen de los ensayos realizados en los agregados empleados

Ensayo		Agregado Fino	Agregado grueso	Método
Humedad Total	%	0.3	0.3	ASTM C566
Peso Unitario Suelto	kg/m ³	1550	1450	ASTM C29
Peso Unitario Compactado	kg/m ³	1750	1600	ASTM C29
Contenido de Vacíos	%	34	40	ASTM C29
Material que pasa la malla N°200	%	2.7	0.6	ASTM C117
Gravedad Específica	-	2.67	2.67	ASTM C127
Gravedad Específica Saturado con Superficie Seca	-	2.70	2.69	ASTM C128
Gravedad Específica Aparente	-	2.73	2.73	ASTM C128
Absorción	%	0.8	0.9	ASTM C127/ C128
Densidad	kg/m ³	2660	2660	ASTM C127
Módulo de fineza	-	2.87	6.50	ASTM C136

Fuente: Laboratorio de Ensayo de Materiales – LEM – UNI

En la figura 4.4, se muestra una imagen del agregado fino y grueso empleado.



Figura 4.4: Agregado fino y agregado grueso empleados.

4.1.3. Agua

Al tratarse de agua proveniente de una red pública, el agua fue del tipo potable, y de acuerdo a la NTP 339.088, “*Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland*”, no es necesario la realización de ensayos para evaluar su conformidad.

4.1.4. Aditivo

El aditivo utilizado para esta investigación se trató de un acelerante controlable de fraguado denominado “Sika 3”. Este tipo de aditivo acelerador de fraguado y endurecimiento en base a cloruros, actúa incrementando la velocidad de hidratación y las reacciones químicas de los constituyentes del cemento.

Se usa en pastas, morteros de fraguado rápido y concreto, en el caso del concreto se usa cuando se requiera alcanzar elevadas resistencias mecánicas en corto tiempo. Su aspecto es tal como se ve en la figura 4.5, tiene un valor de densidad igual a 1.22 kg/L \pm 0.01 y cumple con la norma ASTM C 494 - NTP 334.088, “*Aditivos químicos en pastas, morteros y concreto.*”



Figura 4.5: Aditivo Sika 3 utilizado para el diseño de mezcla.

Para el diseño de mezcla, la cantidad de aditivo utilizado se consideró como el 2% del peso del cemento (%PC) ya que este valor se encontraba en la especificación técnica del aditivo y además porque generaba una mejor trabajabilidad en el concreto.

4.2. DISEÑO DE MEZCLA

Para los ensayos se trabajó con un solo diseño de mezcla cuya resistencia de diseño fue igual a 210 kg/cm^2 y un slump de 6" a 7", el método de diseño fue de acuerdo al propuesto por el ACI 211. La tabla 4.4 muestra las propiedades de los agregados utilizadas en el diseño, mientras que la tabla 4.5 muestra la relación agua/cemento utilizada y así como los porcentajes en volúmenes de los agregados.

Tabla 4.4: Propiedades de los agregados usados en el diseño de mezcla

PROPIEDADES	A.FINO	A.GRUESO
Módulo de fineza	2.87	6.50
Tamaño Máximo Nominal (pulgadas)	-	3/4"
Peso Específico	2.66	2.66
Peso Unitario Suelto (kg/m^3)	1550	1450
Peso Unitario Compactado (kg/m^3)	1750	1600
% Humedad	0.3	0.3
% Absorción	0.8	0.9

Fuente: Propia.

Tabla 4.5: Relación agua/cemento y porcentaje en volúmenes de los agregados

RELACIÓN	%
a/c	0.65
Arena	48
Piedra	52

Fuente: Propia.

La relación a/c se obtuvo a partir de que la resistencia de diseño era igual a 210 kg/cm² mientras que los porcentajes en volúmenes de los agregados se obtuvieron utilizando las tablas del método de Walker, teniendo esto, se sigue con el procedimiento descrito por el ACI:

1er paso: Determinar la cantidad mínima de agua para el diseño de mezcla según tabla 4.6.

Tabla 4.6: Cantidad de agua en lt/m³ según el TMN agregados y asentamiento

Asentamiento	Agua en lt/m ³ , para TMN agregados y consistencia indicadas							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	--
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	187	184	174	166	154	--

Fuente: ACI 2011 mix design.

En nuestro caso, teniendo un tamaño máximo nominal (TMN) igual a 3/4" y asentamiento de 6" a 7", se obtiene que la cantidad de agua es 216 lt/m³.

2do paso: Calcular la cantidad de cemento, agregado fino, agregado grueso en peso para la mezcla.

En primer lugar, teniendo una relación a/c igual a 0.65 y la cantidad de agua igual a 216 lt/m³, se tiene que la cantidad de cemento es 332.3 kg.

Luego se deberá calcular los volúmenes que ocupan el cemento, agua, aire y aditivo a partir del conocimiento de su peso y su peso específico, obteniéndose volúmenes iguales a 0.105, 0.215, 0.02 y 0.005 m³ respectivamente.

Finalmente, se obtiene que el volumen ocupado por los agregados es igual a 0.654 m³, del cual 48% le corresponde al agregado fino mientras que el 52% le corresponde al agregado grueso, véase tabla 4.5.

3er paso: Establecer el contenido de aire a utilizarse en la mezcla.

Ya que para este diseño se trata de un concreto sin aire incorporado y de tamaño máximo nominal de agregado grueso igual a 3/4", se tiene que el contenido de aire es igual a 2%.

4to paso: Corregir por humedad las cantidades de los agregados.

Generalmente los agregados se encuentran húmedos y a su peso seco debe sumarse el peso del agua que contienen, tanto absorbida como superficial, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Peso A. Húmedo} = \text{Peso A. Seco} \cdot (1 + \text{Cont. Humedad del agregado (\%)})$$

Aplicando esto, se obtiene que las cantidades corregidas para el agregado fino y agregado grueso son 837.5kg y 907.3kg respectivamente.

5to paso: Corregir el agua de diseño debido al aporte de los agregados

El agua a utilizarse en la mezcla de prueba debe incrementarse o reducirse en una cantidad igual a la humedad libre que contiene el agregado, lo cual es en otros términos humedad total menos absorción. Tal y como se expresa en la siguiente fórmula:

$$A. \text{ efectiva} = A. \text{ diseño} - \text{Peso agregado seco} \cdot (\% \text{ cont. humedad} - \% \text{ absorción})$$

Teniendo en cuenta esto, el agua efectiva para nuestra mezcla es igual a 225.6 lt.

El resumen de todos los pasos realizados se encuentra en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: Diseño de mezcla para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y $a/c = 0.65$

Material	Peso Seco (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen absoluto (m ³)	Peso Seco / Cantidad de Cemento	Peso Corregido para 1 m ³
Cemento	332.3	3150.0	0.105	1.00	332.3 kg
Agua	216.0	1000.0	0.216	0.65	225.6 lt
Arena	835	2660.0	0.314	2.51	837.5 kg
Piedra	904.6	2660.0	0.340	2.72	907.3 kg
Aire	0.02	-	0.02	-	-
Aditivo	0.006	1.22	0.005	0.02	6.6 kg

Fuente: Propia.

La tabla 4.7 indica que para 1m³ necesitamos 332.3 kg de cemento, 225.6 lt de agua, 837.5 kg de arena, 907.3 kg de piedra y 6.6 kg de aditivo según nuestro diseño.

En nuestro caso, este diseño será utilizado para la elaboración de un conjunto de 4 probetas cilíndricas por tanda, cuyas proporciones de materiales se indican en la tabla 4.8:

Tabla 4.8: Proporciones utilizadas en la elaboración de probetas cilíndricas en el LEM.

MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
Cemento	8.9	kg
Agua	6.0	lt
Arena	22.3	kg
Piedra	24.2	Kg
Aditivo	177.2	gr

Fuente: Propia.

Una vez que se obtuvo las proporciones para la mezcla, se procedió a la realización de los ensayos para determinar la resistencia a la compresión por los siguientes métodos.

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN MUESTRAS CILÍNDRICAS

El procedimiento para realizar este ensayo se encuentra descrito en el punto 2.2.1 del capítulo II de la presente tesis, el número de probetas elaboradas por tanda fue de 4 las cuales fueron curadas en pozas de curado del laboratorio de ensayo de materiales (LEM) y ensayadas a diversas edades.

Respecto al proceso de curado, la figura 4.6 muestra una imagen de las pozas de curado del LEM, normalmente la temperatura de curado está dentro del rango de $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas esta temperatura estaba dentro del rango de $18 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Esta temperatura de curado es de mucha importancia para la aplicación de la ecuación de Arrhenius para los ensayos realizados utilizando el método de madurez.

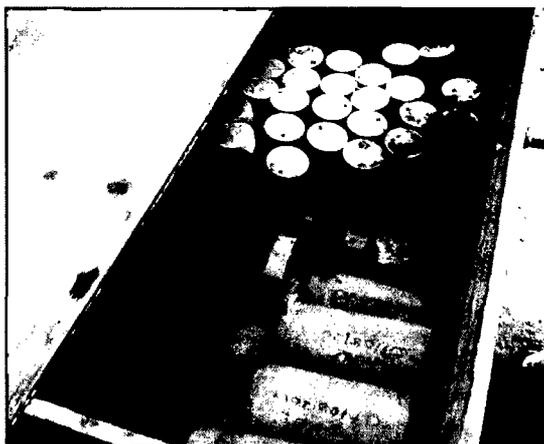


Figura 4.6: Poza de curado del LEM – UNI.

En la figura 4.7, se puede ver los equipos utilizados para realizar ensayos de resistencia a la compresión del concreto. Ambos equipos cuentan con su certificado de calibración en el LEM.



Figura 4.7: Máquina universal utilizada para el ensayo de compresión.

La tabla 4.9 muestra los resultados de 12 probetas que se usaron para la elaboración de las curvas patrones en los métodos indirectos que determinan la resistencia a la compresión, mientras que la tabla 4.10 muestra los resultados de 52 probetas ensayadas para el análisis de estos métodos.

Tabla 4.9: Resultados para la elaboración de curvas patrones de los métodos indirectos.

Edad (días)	Di (cm)	Ai (cm ²)	Fi (kg)	f'c (kg/cm ²)	Ensayo (kg/cm ²)	Error (%)
1	15.3	184	14300	78	81	-4
	15.3	184	15600	85		4
3	15.3	184	29200	159	164	-3
	15.3	183	30900	170		3
5	15.4	186	32620	174	190	-8
	15.3	185	37886	205		8
7	15.3	184	35400	192	200	-4
	15.3	184	38350	208		4
14	15.4	186	45400	244	233	5
	15.4	186	41200	222		-5
28	15.2	181	55400	306	299	2
	15.3	184	53800	292		-2

Fuente: Propia.

Tabla 4.10: Resultados del método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas

Edad (días)	Di (cm)	Ai (cm ²)	Fi (kg)	f _c (kg/cm ²)	Ensayo (kg/cm ²)	Error (%)
1	15.5	189	10995	58	60	-3
	15.5	189	11529	61		2
1	15.4	186	10154	54	54	1
	15.3	184	9784	53		-1
2	15.4	186	20889	112	119	-6
	15.3	184	23171	126		6
3	15.5	189	25400	135	133	1
	15.4	186	24650	132		-1
3	15.4	186	25000	134	132	2
	15.4	186	24200	130		-2
3	15.2	181	24232	134	135	-1
	15.3	184	25025	136		1
3	15.3	184	25779	140	135	4
	15.3	184	23972	130		-3
4	15.3	184	30714	167	172	-3
	15.4	186	33062	178		3
6	15.3	184	35374	192	186	3
	15.4	186	33523	180		-3
6	15.4	186	36206	194	191	2
	15.3	184	34681	188		-1
7	15.4	186	31986	172	182	-6
	15.3	184	35249	192		5
7	15.4	186	35820	192	196	-2
	15.5	189	37490	199		1
8	15.4	186	45051	242	227	7
	15.3	184	39118	213		-6
8	15.3	184	43092	234	235	0
	15.5	189	44544	236		0
8	15.4	186	42666	229	214	7
	15.3	184	36611	199		-7
8	15.5	189	36964	196	214	-8
	15.3	184	42811	233		9
14	15.4	186	45200	243	251	-3
	15.4	186	48500	260		4

14	15.4	186	47100	253	259	-2
	15.4	186	49300	265		2
21	15.3	184	44763	243	249	-2
	15.5	189	47915	254		2
21	15.4	186	49026	263	263	0
	15.5	189	49506	262		0
22	15.4	186	52096	280	275	2
	15.3	184	49765	270		-2
27	15.4	186	50913	273	267	2
	15.3	184	47964	261		-2
27	15.5	189	54088	287	279	3
	15.4	186	50608	271		-3
28	15.3	184	52022	283	289	-2
	15.3	184	54118	294		2
28	15.3	184	54772	298	301	-1
	15.4	186	56582	304		1
28	15.4	186	57444	308	302	2
	15.3	184	54491	296		-2

Fuente: Propia.

De acuerdo al comité del ACI 214, "Evaluation of Strength Test Results of Concrete" para el caso de 210 kg/cm² se espera una resistencia máxima permitida igual a 294 kg/cm² a la edad de 28 días, de las tablas 4.10 y 4.11 se observa que la mayoría de resultados son inferiores a 294 kg/cm².

Respecto a la desviación que se da entre dos probetas ensayadas, punto que puede apreciarse en las ultimas columnas de las tablas 4.9 y 4.10, de acuerdo a la ASTM C39 es común esperarse valores dentro del rango de $\pm 6.6\%$. Sin embargo, como es sabido, para edades tempranas es usual tener desviaciones mayores a estas aceptándose hasta un máximo de $\pm 10\%$.

4.4. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO NORMALIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO POR EL MÉTODO DE MADUREZ

Para poder realizar ensayos por medio de este método, es obligatorio desarrollar primeramente la curva madurez vs. resistencia o curva patrón cuyo procedimiento se encuentra descrito en el punto 3.4.2.4 del capítulo III de esta investigación.

4.4.1. Desarrollo de la curva madurez vs resistencia

Con el fin de calcular la madurez es necesario medir la temperatura interna del concreto, que en nuestro caso se hará por medio del uso de termocuplas tipo K y un termómetro electrónico FLUKE, véase figura 4.8.



Figura 4.8: Termocupla tipo K y termómetro electrónico FLUKE.

Las termocuplas son sensores de temperaturas usados comúnmente en las industrias, consisten de dos alambres de distinto material unidos en un extremo que al aplicar un cambio térmico genera un voltaje muy pequeño que permite la lectura de la temperatura. El termómetro electrónico es un equipo utilizado para la lectura de las temperaturas por medio de circuitos electrónicos, los cuales son capaces de detectar el voltaje generado por el cambio térmico del material en estudio. Para el desarrollo de la curva madurez vs. resistencia, se elaboró dos perfiles térmicos de dos probetas cilíndricas. En cada una de ellas se instaló una termocupla en el tercio central, véase figura 4.9.



Figura 4.9: Instalación de la termocupla en la probeta cilíndrica de concreto.

En la figura 4.10 se muestran los perfiles térmicos correspondientes a las dos probetas estudiadas, de esta figura se puede notar que las lecturas de las temperaturas de las dos probetas son prácticamente las mismas.

Cuando se elaboró este perfil, la temperatura de curado fluctuaba entre $20 \pm 1^\circ\text{C}$ mientras que para los demás perfiles térmicos la temperatura de curado estuvo entre el rango de $18 \pm 1^\circ\text{C}$ como se mencionó en el punto 4.3.

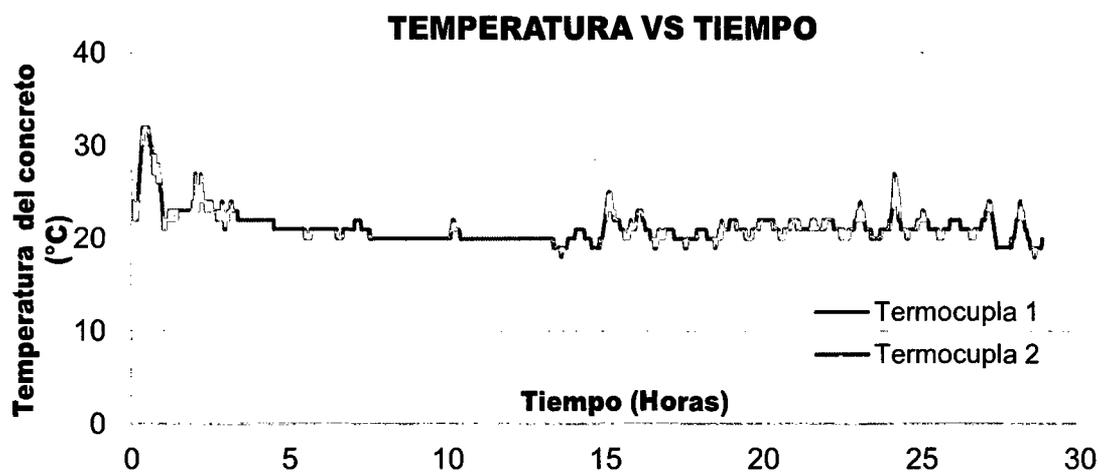


Figura 4.10: Curva temperatura vs tiempo

A partir de la obtención de esta curva, el siguiente paso es calcular la madurez para las edades que se estén estudiando. De acuerdo a la ASTM C1074, existen dos tipos de modelos que permiten obtener la madurez: el Factor Temperatura-Tiempo (FTT) y la Edad Equivalente (E-eq).

4.4.1.1. Resultados para el modelo de Nurse – Saúl

En la tabla 4.11, se muestra el registro utilizado para el cálculo de la madurez por medio del modelo de Nurse - Saúl, a continuación se verá el significado de cada columna de la siguiente tabla.

Tabla 4.11: Cálculo de la madurez por el modelo de Nurse – Saúl.

Edad (1)	Hora (2)	Termocupla 1 (3)	Termocupla 2 (4)	Temperatura media (5)	F.T.T (6)	F.T.T acumulado (7)
0.000	01:30	23	23	23	0	0
0.010	01:45	23	23	23	6	6
0.021	02:00	23	23	23	6	12
0.031	02:15	24	23	23.5	5	17
0.042	02:30	24	23	23.5	6	23
0.052	02:45	23	23	23	6	29
0.062	03:00	23	23	23	6	35
0.073	03:15	23	23	23	6	41
0.083	03:30	23	23	23	5	46
0.094	03:45	23	22	22.5	6	52
0.104	04:00	23	23	23	6	58
0.115	04:15	23	23	23	5	63
0.125	04:30	23	22	22.5	6	69
0.135	04:45	22	22	22	6	75
0.146	05:00	23	22	22.5	5	80
0.156	05:15	23	22	22.5	6	86
0.167	05:30	23	23	23	6	92
0.177	05:45	23	23	23	5	97
0.187	06:00	24	24	24	6	103
0.198	06:15	24	24	24	6	109
0.208	06:30	24	24	24	6	115
0.218	06:45	25	24	24.5	6	121
0.229	07:00	26	26	26	7	128
0.240	07:15	26	26	26	6	134

0.250	07:30	27	27	27	7	141
-------	-------	----	----	----	---	-----

Fuente: Propia.

- Las columnas (1) y (2) indican la edad en días y horas respectivamente, cabe mencionar que la toma de datos se hizo usando intervalos de 15 minutos hasta la edad de 5 días mientras que en adelante el intervalo se aumentó a una hora.
- Las columnas (3) y (4) son las lecturas de las temperaturas otorgadas por las termocuplas instaladas en las dos probetas.
- La columna (5) es el promedio de las lecturas en las columnas (3) y (4) tal y como requiere la normativa para madurez del concreto.
- La columna (6) indica el cálculo del factor temperatura – tiempo por medio del modelo de Nurse – Saúl, véase punto 3.2.1 del capítulo 3.
- Finalmente la columna (7) muestra los valores acumulados del factor temperatura - tiempo, estos valores indican por ejemplo que a la edad de 0.25 días se tiene un factor temperatura - tiempo igual a 141 °C-hr. Es de esta manera como se calculará este factor para edades de interés.

Un punto importante a detallar es que para el cálculo del factor temperatura-tiempo se consideró un valor de temperatura datum igual a 0°C, debido a que este factor por lo general se toma constante dependiendo del lugar donde se esté ensayando, por ejemplo en USA este valor es igual a -10°C. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se pudo obtener la tabla 4.12:

Tabla 4.12: Puntos obtenidos para la elaboración de la curva patrón según el modelo de Nurse – Saúl.

Edad (días)	f _c (kg/cm ²)	FTT (°C-hr)
1	81	618
3	164	1794
5	190	2839
7	200	3904
14	233	7113
28	299	14673

Fuente: Propia.

La tabla anterior sería gráficamente la figura 4.11, que a su vez es la curva madurez vs. resistencia o curva patrón. Es a partir de esta curva que se podrá realizar estimaciones de la resistencia a la compresión de acuerdo al modelo de Nurse – Saúl.

La normativa para el método de madurez indica que se puede crear una correlación del tipo exponencial, logarítmico o hiperbólico. En nuestro caso se optó por el tipo logarítmico, ya que posee un coeficiente de correlación igual a 0.987, cuya ecuación es igual a:

$$f'c = 65.481 \ln(M) - 335.93$$

Donde:

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto en kg/cm^2

M: Madurez según el modelo de Nurse – Saúl o FTT en $^{\circ}\text{C} - \text{hrs}$.

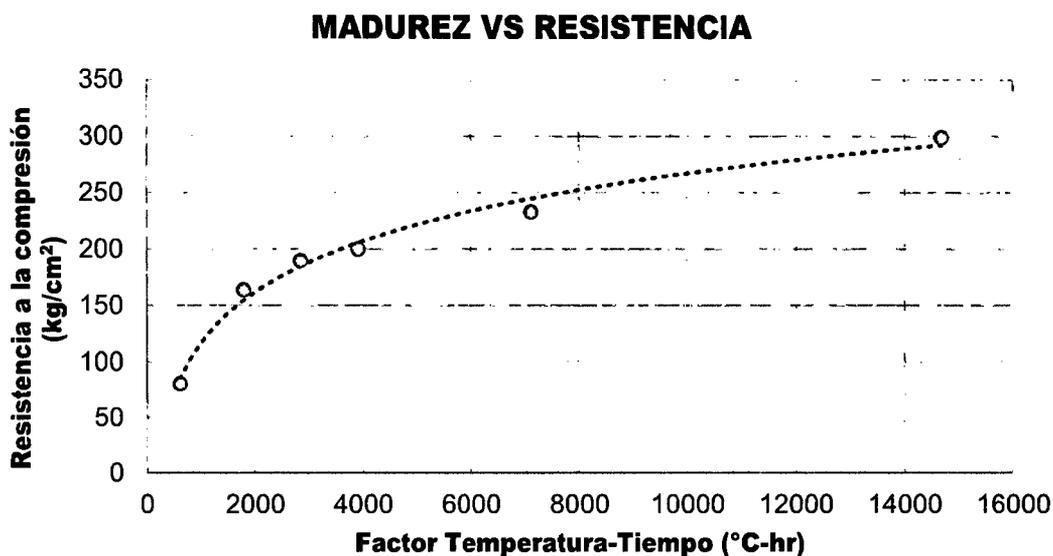


Figura 4.11: Curva madurez vs resistencia según el modelo de Nurse – Saúl.

4.4.1.2. Resultados para el modelo de Arrhenius

En la tabla 4.13 se muestra el registro utilizado para el cálculo de la madurez por medio del modelo de Arrhenius, a continuación se verá el significado de cada columna de la siguiente tabla.

Tabla 4.13: Cálculo de la madurez por el modelo de Arrhenius

Edad (1)	Hora (2)	Termocupla 1 (3)	Termocupla 2 (4)	Temperatura media (5)	Edad-equivalente (6)	Edad-equivalente acumulada. (7)
0.000	01:30	23	23	23	0.0	0
0.010	01:45	23	23	23	0.3	0
0.021	02:00	23	23	23	0.3	1
0.031	02:15	24	23	23.5	0.3	1
0.042	02:30	24	23	23.5	0.3	1
0.052	02:45	23	23	23	0.3	1
0.063	03:00	23	23	23	0.3	2
0.073	03:15	23	23	23	0.3	2
0.083	03:30	23	23	23	0.3	2
0.094	03:45	23	22	22.5	0.3	3
0.104	04:00	23	23	23	0.3	3
0.115	04:15	23	23	23	0.3	3
0.125	04:30	23	22	22.5	0.3	3
0.135	04:45	22	22	22	0.3	4
0.146	05:00	23	22	22.5	0.3	4
0.156	05:15	23	22	22.5	0.3	4
0.167	05:30	23	23	23	0.3	5
0.177	05:45	23	23	23	0.3	5
0.188	06:00	24	24	24	0.3	5
0.198	06:15	24	24	24	0.3	5
0.208	06:30	24	24	24	0.3	6
0.219	06:45	25	24	24.5	0.3	6
0.229	07:00	26	26	26	0.3	6
0.240	07:15	26	26	26	0.3	7
0.250	07:30	27	27	27	0.3	7

Fuente: Propia.

- Las columnas (1) y (2) indican la edad en días y horas respectivamente, cabe mencionar que la toma de datos se hizo usando el mismo criterio que el modelo de Nurse – Saúl.
- Las columnas (3) y (4) son las lecturas de las temperaturas otorgadas por las termocuplas instaladas en las dos probetas.
- La columna (5) es el promedio de las lecturas en las columnas (3) y (4) tal y como requiere la normativa para madurez del concreto.
- La columna (6) indica el cálculo de la edad equivalente empleando el modelo de Arrhenius, véase punto 3.2.3 del capítulo 3.
- Finalmente la columna (7) muestra los valores acumulados de la edad equivalente, estos valores indican por ejemplo que a la edad de 0.25 días tenemos una edad equivalente igual a 7 días. Es de esta manera como se calculará este factor para edades de interés.

Cabe mencionar que para la obtención de la edad equivalente se utilizó dos variables importantes, la primera es la temperatura de curado (T_r) y la segunda es la energía aparente de activación (E_a). Para la primera variable, como ya se viene mencionando, se tomó un valor igual a 20°C esto solamente para este ensayo, para los demás cálculos esta variable será igual a 18°C. Para estos valores se tiene que la E_a es igual a 33500 J/mol.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se pudo obtener la tabla 4.14:

Tabla 4.14: Puntos obtenidos para la elaboración de la curva patrón según el modelo de Arrhenius.

Edad (días)	f'c (kg/cm²)	Edad-equivalente (horas)
1	81	32
3	164	91
5	190	143
7	200	196
14	233	357
28	299	734

Fuente: Propia.

La tabla anterior sería gráficamente la figura 4.12, que a su vez es la curva madurez vs. resistencia o curva patrón. Es a partir de esta curva que se podrá realizar estimaciones de la resistencia a la compresión de acuerdo al modelo de Arrhenius.

La normativa para madurez indica que se puede crear una correlación del tipo exponencial, logarítmico o hiperbólico. En nuestro caso se optó por el tipo logarítmico, ya que posee un coeficiente de correlación igual a 0.987, cuya ecuación para esta investigación es igual a:

$$f'_c = 66.177 \ln(E) - 144.03$$

Donde:

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto en kg/cm^2

E: Madurez calculada de acuerdo al modelo de Arrhenius o edad equivalente en días.

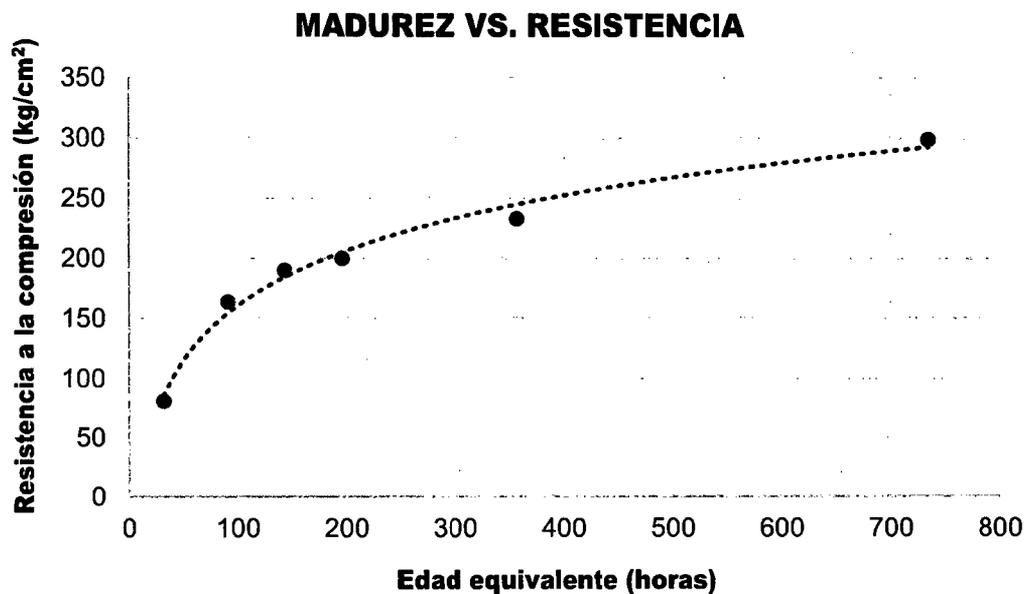


Figura 4.12: Curva madurez vs. resistencia según el modelo de Arrhenius.

4.4.2. Resultados generados para evaluar la precisión del método de madurez

Teniendo desarrollada las curvas patrones para ambos métodos, se presentará los resultados del resto de probetas que permitirán evaluar la precisión del método de madurez y así como otros objetivos propuestos.

Para empezar se mostrará los perfiles térmicos registrados para estos ensayos, las figuras 4.13 y 4.14 son perfiles térmicos medidos hasta la edad de 28 días mientras que la figura 4.15 solo tiene lecturas hasta la edad de 7 días.

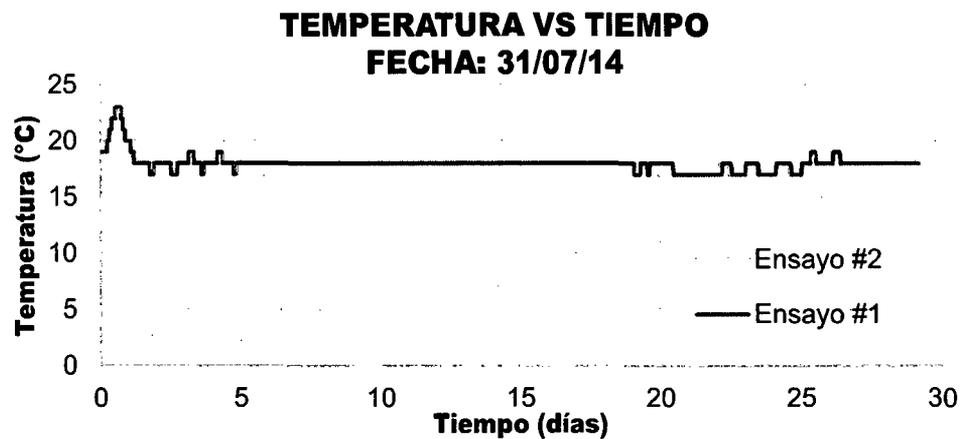


Figura 4.13: Perfil térmico del concreto elaborado el 31 de julio del 2014.

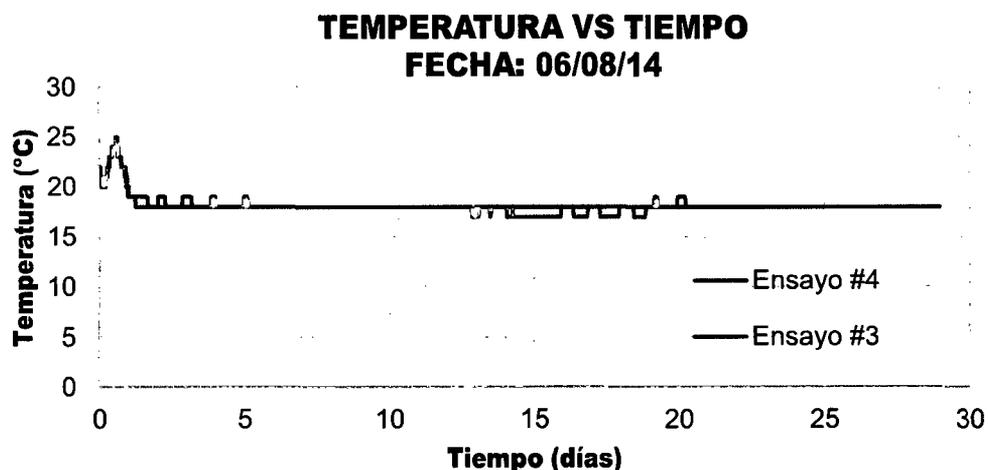


Figura 4.14: Perfil térmico del concreto elaborado el 06 de agosto del 2014.

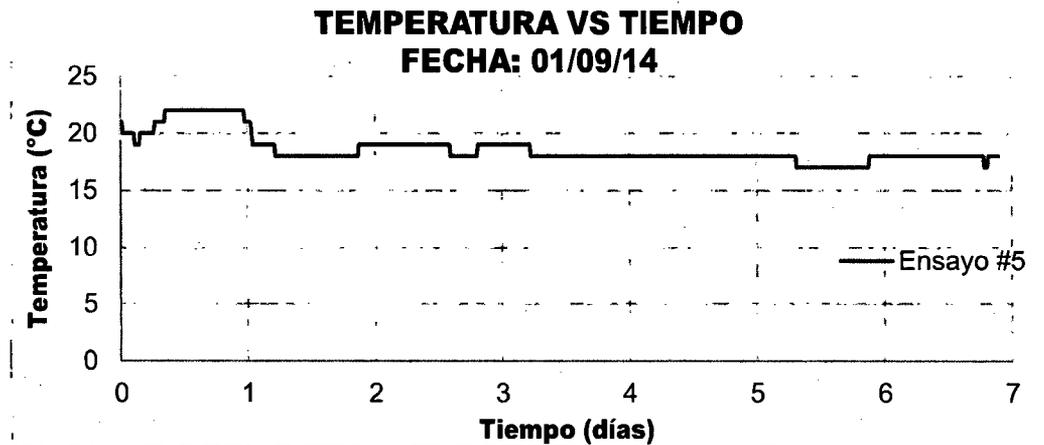


Figura 4.15: Perfil térmico del concreto elaborado el 01 de setiembre del 2014.

A partir de estos perfiles se puede obtener los valores de madurez utilizando los dos diferentes modelos, tal y como se hizo para el caso de la curva madurez vs resistencia.

4.4.2.1. Valores obtenidos para el modelo de Nurse – Saúl

La tabla 4.15 muestra las mediciones obtenidas para el caso del modelo de Nurse – Saúl.

Tabla 4.15: Resultados de resistencia usando el modelo de Nurse – Saul.

Edad (días)	Madurez (°C-hr)	R. Madurez (kg/cm ²)	R. Probetas (kg/cm ²)	Diferencia (kg/cm ²)	Error (%)
1	512	73	60	-13	-22
1	505	72	54	-18	-33
2	892	109	119	10	8
3	1385	137	133	-4	-3
3	1416	139	132	-7	-5
3	1314	134	135	1	1
3	1315	134	135	1	1
4	1738	153	172	19	11
6	2771	183	191	8	4
6	2783	183	186	3	2
7	3069	190	182	-8	-4
7	3074	190	196	6	3
8	3557	200	227	27	12

8	3545	199	235	36	15
8	3545	199	214	15	7
8	3572	200	214	14	7
14	6122	235	251	16	6
14	6134	235	259	24	9
21	9226	262	263	1	0
21	9221	262	249	-13	-5
22	9601	265	275	10	4
27	11742	278	267	-11	-4
27	11817	278	279	1	0
28	12182	280	289	9	3
28	12120	280	301	21	7
28	12195	280	302	22	7

Fuente: Propia.

4.4.2.2. Valores obtenidos para el modelo de Arrhenius

La tabla 4.16 muestra las mediciones obtenidas para el caso del modelo de Arrhenius.

Tabla 4.16: Mediciones de la resistencia usando el modelo de Arrhenius.

Edad (días)	Edad-equivalente (días)	R. Madurez (kg/cm ²)	R. Probetas (kg/cm ²)	Diferencia (kg/cm ²)	Error (%)
1	28	77	60	-17	-28
1	28	77	54	-23	-43
2	49	114	119	5	4
3	77	143	133	-10	-8
3	78	144	132	-12	-9
3	72	139	135	-4	-3
3	73	140	135	-5	-4
4	96	158	172	14	8
6	154	189	191	2	1
6	154	189	186	-3	-2
7	170	196	182	-14	-8
7	170	196	196	0	0
8	197	206	227	21	9
8	197	206	235	29	12
8	196	205	214	9	4
8	198	206	214	8	4
14	340	242	251	9	4

14	340	242	259	17	7
21	512	269	263	-6	-2
21	513	269	249	-20	-8
22	534	272	275	3	1
27	653	285	267	-18	-7
27	656	285	279	-6	-2
28	677	287	289	2	1
28	674	287	301	14	5
28	677	287	302	15	5

Fuente: Propia.

En las tablas 4.15 y 4.16, R. Madurez hace referencia a la resistencia a la compresión estimada por la ASTM C 1074 y R. Probetas es la resistencia proporcionada por la ASTM C 39.

4.5. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO

Al igual que el método de madurez, primeramente se debe establecer la curva número de rebote vs resistencia. La figura 4.16 muestra el equipo utilizado para realizar el ensayo del número de rebote

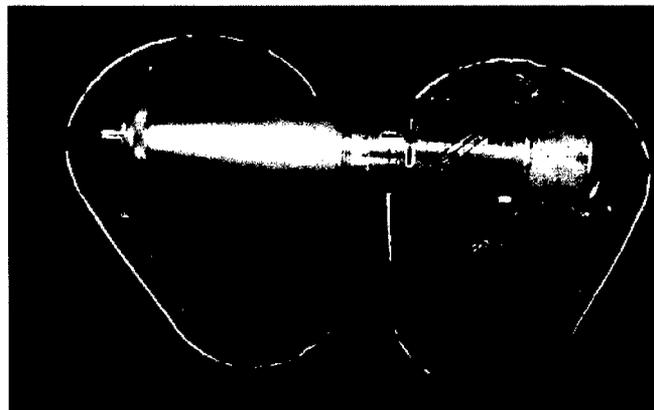


Figura 4.16: Esclerómetro o martillo de Schmidt del LEM.

4.5.1. Desarrollo de la curva número de rebote vs. resistencia

Siguiendo el procedimiento descrito en el punto 2.2.2.1 del capítulo 2 de la presente investigación, se obtuvo la tabla 4.17.

Tabla 4.17: Puntos obtenidos para la curva número de rebote vs. resistencia.

Edad (días)	Número de rebote (-)	f'c (kg/cm²)
1	17	81
3	22	164
5	24	190
7	25	200
14	28	233
28	30	299

Fuente: Propia.

Gráficamente la tabla anterior sería la figura 4.17, curva que se busca desarrollar ya que en base a esta se podrá estimar resistencias conociendo su respectivo número de rebote.

Como se mencionó anteriormente, las normas no indican que tipo de función utilizar para ajustar los puntos obtenidos. En este caso se utilizó una del tipo lineal, ya que es la más utilizada y la que mejor ha dado resultados en otras investigaciones, cuyo coeficiente de correlación igual a 0.975 y es de la forma:

$$f'c = 15.589 R - 184.82$$

Donde:

f'c: Resistencia a la compresión en kg/cm².

R: Número de rebote registrado.

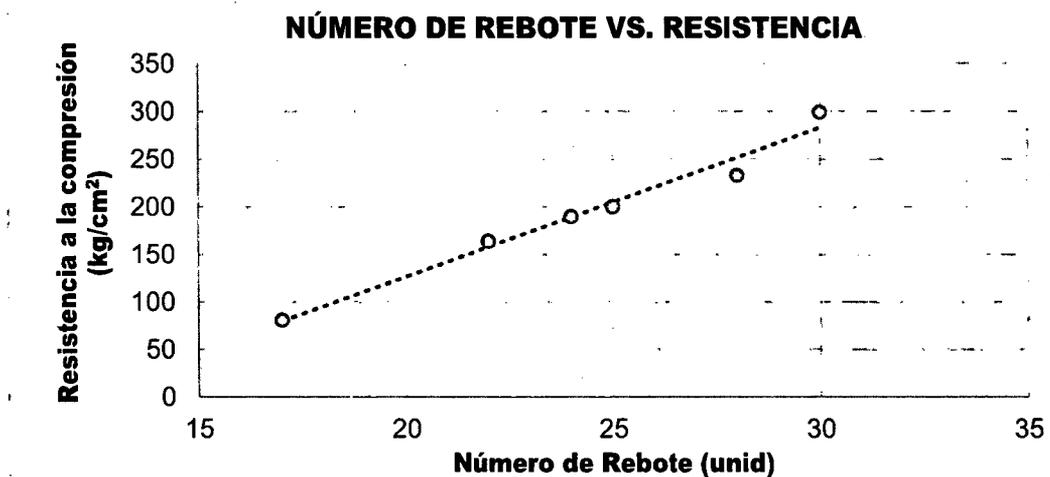


Figura 4.17: Curva número de rebote vs. resistencia.

4.5.2. Resultados generados para evaluar la precisión del método de número de rebote

Teniendo la curva número de rebote vs resistencia desarrollada, se pudo obtener la tabla 4.18, que indica los resultados de los ensayos del número de rebote comparado con el método de probetas cilíndricas.

Tabla 4.18: Mediciones de la resistencia utilizando el número de rebote.

Edad (días)	Número de rebote (-)	R.Rebote (kg/cm ²)	R.Probetas (kg/cm ²)	Diferencia (kg/cm ²)	Error (%)
1	16	65	60	-5	-8
1	17	80	54	-26	-48
2	18	96	119	23	19
3	23	174	133	-41	-31
3	24	190	132	-58	-44
3	22	158	135	-23	-17
3	23	174	135	-39	-29
4	25	197	172	-25	-15
6	24	190	186	-4	-2
6	27	229	191	-38	-20
7	27.5	236	182	-54	-30
7	23.5	182	196	14	7
8	29.5	275	227	-48	-21
8	27.5	236	235	-1	0

8	29	260	214	-46	-21
8	28.5	252	214	-38	-18
14	29	260	251	-9	-4
14	28	244	259	15	6
21	29	260	249	-11	-4
21	30	268	263	-5	-2
22	29.5	275	275	0	0
27	30.5	283	267	-16	-6
27	30.5	283	279	-4	-1
28	31	307	289	-18	-6
28	26	221	301	80	27
28	28	244	302	58	19

Fuente: Propia.

De la tabla 4.18, R. Rebote hace referencia a la resistencia a la compresión estimada por la ASTM C 805 y R. Probetas es la resistencia otorgada por la ASTM C 39.

4.6. RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO

La presentación de los resultados para el método de velocidad de pulso será igual al utilizado en el método del número de rebote. El equipo utilizado para realizar el ensayo de velocidad de pulso se muestra en la figura 4.18.



Figura 4.18: Equipo V-meter MK IV del LEM.

4.6.1. Desarrollo de la curva velocidad de pulso vs. resistencia

Siguiendo el procedimiento descrito en el punto 2.2.3.1 del capítulo 2 de la presente investigación, se obtuvo la tabla 4.19.

Tabla 4.19: Puntos obtenidos para la curva velocidad de pulso vs resistencia.

Edad (días)	Velocidad de pulso (m/s)	f'c (kg/cm ²)
1	3.057	78
1	2.960	85
3	3.482	159
3	3.215	169
7	3.466	192
7	3.700	208
14	3.623	244
14	3.585	222
28	3.666	306
28	3.669	292

Fuente: Propia.

Gráficamente la tabla anterior sería la figura 4.19, curva que se busca desarrollar ya que en base a esta se podrá estimar resistencias conociendo su respectiva velocidad de pulso.

Como se mencionó anteriormente, las normas no indican que tipo de función utilizar para ajustar los puntos obtenidos. En este caso se utilizó una del tipo cuadrático, debido a que es la más utilizada y la que mejor ha dado resultados en otras investigaciones, cuyo coeficiente de correlación igual a 0.796 y es de la forma:

$$f'c = 112.82 v^2 - 501.55v + 577.68$$

Donde:

f'c: Resistencia a la compresión en kg/cm².

v: Velocidad de pulso en m/s.

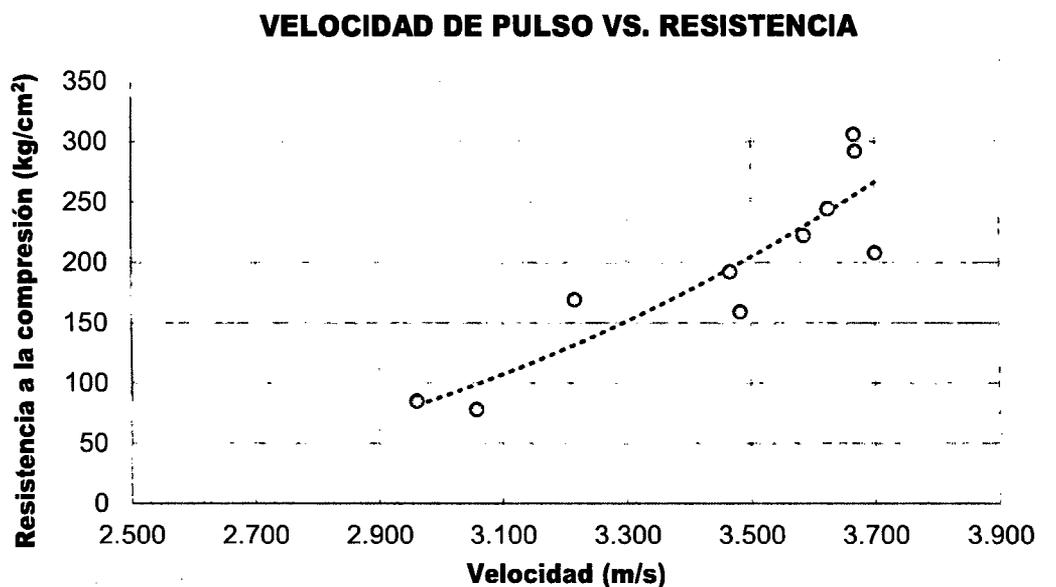


Figura 4.19: Curva velocidad de pulso vs. resistencia.

4.6.2. Resultados generados para evaluar la precisión del método de velocidad de pulso

Teniendo la curva velocidad de pulso vs resistencia desarrollada, se pudo obtener la tabla 4.20, la cual indica los resultados de los ensayos del número de velocidad de pulso comparado con el método de probetas cilíndricas, similar al desarrollado para el método de número de rebote.

Tabla 4.20: Mediciones de la resistencia utilizando la velocidad de pulso

Edad (días)	V. Pulso (m/s)	R. Ultrasonido (kg/cm ²)	R. Probetas (kg/cm ²)	Diferencia (kg/cm ²)	Error (%)
1	3017	92	60	-32	-53
1	3091	106	54	-52	-96
2	3145	117	119	2	2
3	3088	105	133	28	21
3	3202	128	132	4	3
3	3295	150	135	-15	-11
3	3286	149	135	-14	-10
4	3338	161	172	11	6
6	3698	266	191	-75	-39

6	3515	209	186	-23	-12
7	3373	170	182	12	7
7	3299	153	196	43	22
8	3572	226	227	1	0
8	3361	168	235	67	29
8	3487	201	214	13	6
8	3520	211	214	3	1
14	3490	202	251	49	20
14	3559	222	259	37	14
21	3405	180	249	69	28
21	3437	187	263	76	29
22	3562	224	275	51	19
27	3466	195	267	72	27
27	3637	246	279	33	12
28	3502	205	289	84	29
28	3657	253	301	48	16
28	3636	246	302	56	19

Fuente: Propia.

En la tabla 4.20, V. Pulso es la abreviatura de velocidad de pulso, R. Ultrasonido hace referencia a la resistencia estimada por la ASTM C 597 y R. Probetas es la resistencia otorgada por la ASTM C 39.

CAPÍTULO V: ENSAYOS DE MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

En este capítulo se verá la aplicación del método de madurez del concreto en un proyecto nacional; los puntos a ver son los siguientes:

5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto en el cual se implementó este nuevo método se llama “Nuevo Edificio Corporativo GyM” ubicado en la Av. Petit Thouars cuadra 49, al frente del Plaza Vea de Miraflores como se aprecia en la figura 5.1.



Figura 5.1: Vista del proyecto nuevo edificio corporativo GyM.

Este proyecto consiste en la construcción de oficinas, que posteriormente serán utilizadas por una empresa de nuestro medio local, y además posee cuatro sótanos, siete pisos y azotea en un área techada de 17,200 m².

A diferencia de otros proyectos, este se caracteriza por implementar nuevas técnicas constructivas, por ejemplo: el uso del BIM (*Building Information Modeling*), losas postensadas, el método de madurez y aisladores sísmicos, véase figura 5.2.

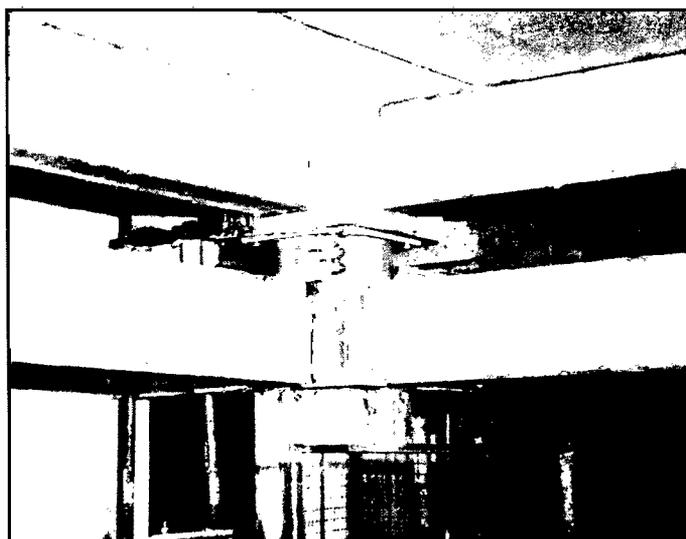


Figura 5.2: Aislador sísmico del proyecto nuevo edificio corporativo GyM.

5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ

La implementación del método de madurez se realizó en diversos elementos estructurales del proyecto, muros anclados, losas post tensadas y macizas, columnas y vigas son algunos ejemplos. El asesoramiento técnico fue gracias a una empresa chilena, ya que en Chile es común utilizar el método de madurez en sus actuales proyectos.

Un punto importante a mencionar es que en este proyecto, para estimar la resistencia a la compresión del concreto se emplearon el método de madurez y el método de probetas cilíndricas, ya que sólo esos dos métodos fueron objeto de investigación de la empresa constructora.

A nivel de proyecto, se utilizó un equipo de 3era generación que consiste de un lector de la empresa Intellirock y termocuplas como se ven la figura 5.3. En comparación con el equipo utilizado a nivel de laboratorio, el cual era de 2da generación, la termocupla que se ve en la figura 5.3 tienen una memoria interna que le permite registrar automáticamente la temperatura sin necesidad de que esté se encuentre conectado al lector.

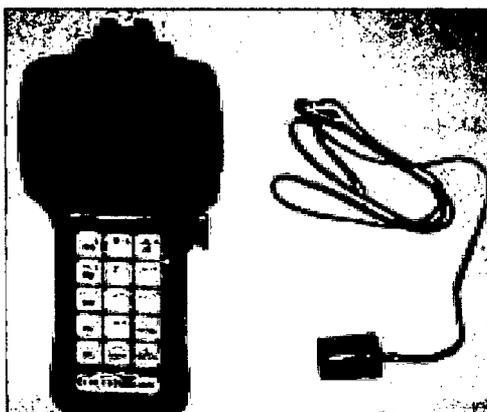


Figura 5.3: Equipo Intellirock y termocupla.

Además el equipo intellirock empleado estaba programado solamente para el modelo de Nurse – Saúl, su certificado de calibración se encuentra en el anexo B.

Teniendo en cuenta el equipo empleado y los elementos en que se utilizaron, el siguiente punto a ver será el diseño de mezcla estudiado.

5.2.1. Concreto de 350 kg/cm² y slump 4" a 6"

Las características del diseño de la mezcla estudiada son mostradas en la tabla 5.1 y 5.2. Estas tablas han sido extraídas de la información técnica del diseño característico proporcionado por UNICON para cumplir con las especificaciones técnicas del concreto premezclado del proyecto.

Tabla 5.1: Diseño característico de la mezcla

Características	Diseño	Unidades
Resistencia (f'c)	350	Kg/cm ²
Agua / Cemento	0.40	-
Tipo de cemento	I	-
Agregado Fino	49	%
Agregado Grueso (Huso 57)	51	%
Peso Unitario	2397	Kg/m ³
Slump	4" a 6"	Pulgadas

Fuente: Información técnica JIC-1350N57B-60, UNICON.

Tabla 5.2: Características de los insumos de la mezcla

Insumo	Procedencia	Especificación
Agregado Fino	Jicamarca	ASTM C 33
Agregado Grueso –Huso 57	Jicamarca	ASTM C 33
Cemento tipo I	Cementos Lima	ASTM C 150
Polyheed 770 R	BASF - Perú	ASTM C 494 Tipo B y D
Rheobuild 1000	BASF - Perú	ASTM C 494 Tipo A y F
Agua	Red Pública	NTP 339.088

Fuente: Información técnica JIC-1350N57B-60, UNICON.

De la tabla 5.2, hay que precisar que el aditivo Polyheed 770 R es un reductor de agua de medio rango, su principal función en la mezcla es darle una mejor manejabilidad en el proyecto. Mientras que el aditivo Rheobuild 1000 es también un reductor de agua pero de alto rango, su principal función en la mezcla es de generar el desarrollo rápido de altas resistencias.

5.2.2 Ensayos de la resistencia a la compresión utilizando el método de probetas cilíndricas y el método de madurez

Antes de mostrar los resultados otorgados de la implementación del método de madurez en este proyecto, hay que precisar que el valor de la temperatura datum fue igual a 0°C para todos los ensayos, este valor fue una recomendación por parte de un especialista chileno.

5.2.2.1 Desarrollo de la curva madurez vs resistencia para el diseño de mezcla

De acuerdo a lo descrito en los anteriores capítulos, para poder emplear el método de madurez es obligatorio desarrollar la curva base: "Madurez vs Resistencia". Para ese fin, se elaboraron 12 probetas cilíndricas y una de ellas fue curada en obra para poder realizar las mediciones de madurez tal como se muestra en la figura 5.4, mientras que las otras fueron trasladadas a un laboratorio nacional, GEOS consultores

asesores, para poder ser ensayadas en las edades requeridas. La tabla 5.3 muestra los puntos obtenidos para la generación de esta curva.

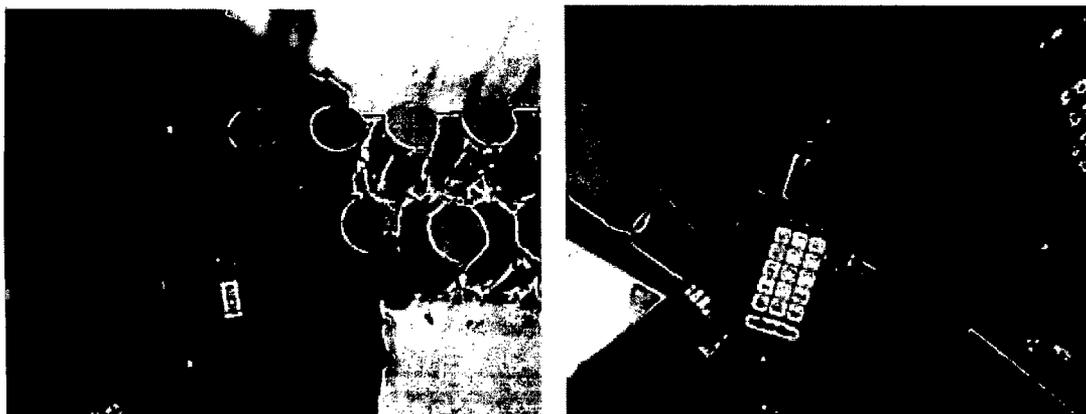


Figura 5.4: Probetas utilizadas para la implementación del método de madurez.

Tabla 5.3: Puntos obtenidos para la curva madurez vs. resistencia ($f'c = 350$ kg/cm²)

Edad (días)	Temperatura (°C)	FTT (°C-hr)	f'c (Kg/cm ²)
1	30	250	135
2	28	687	196
3	27	1260	209
4	32	1756	223
7	28	3116	241
8	27	3819	293
14	26	7507	331
28	28	15958	368

Fuente: Propia.

Si deseamos apreciar de manera gráfica esta tabla sería la figura 5.5, de igual manera que el capítulo 4, el ajuste de estos puntos fue por medio de una curva logarítmica. En nuestro caso la ecuación de esta curva es como sigue, la cual posee un coeficiente de correlación igual a 0.96.

$$f'c = 56.543 \cdot \ln(M) - 185.58$$

Donde:

M: factor de temperatura-tiempo en °C – hr

f'c: resistencia a la compresión en kg/cm².

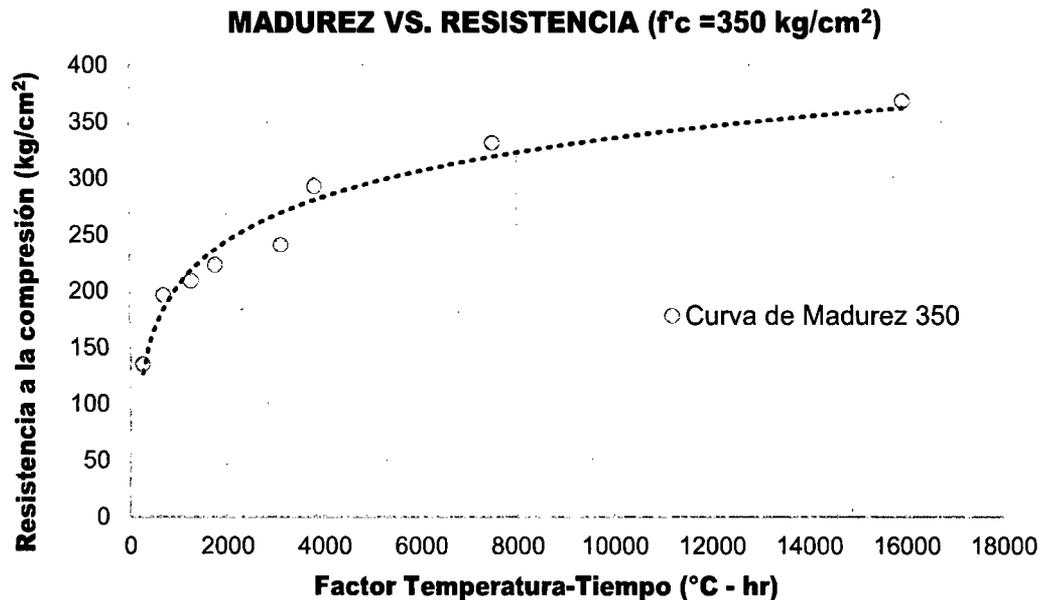


Figura 5.5: Curva Madurez vs. Resistencia para un concreto de $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$.

5.2.2.2 Resultados generados por la implementación del método de madurez

El primer elemento en el cual se realizó la implementación de este método fue un muro anclado de $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$. Su implementación se hizo para conocer cuando el concreto alcanzaba una resistencia de 210 kg/cm^2 , ya que con esta resistencia se podía realizar el desencofrado. La figura 5.6 muestra las mediciones realizadas en el muro anclado mientras que la tabla 5.4 nos indica las mediciones obtenidas en este muro.



Figura 5.6: Mediciones de la madurez utilizando el equipo Intellirock.

Tabla 5.4: Resultados de la implementación en un muro anclado.

Edad (días)	Temperatura (°C)	Madurez (°C-hr)	Resistencia estimada (kg/cm²)
1	57	295	136
2	41	1059	208
3	35	1482	227
4	32	1620	232
7	29	2852	264
14	30	10908	340
28	29	19286	372

Fuente: propia.

El segundo elemento en el cual se estudió el método de madurez fueron losas postensadas, a continuación se mostrarán los resultados de su implementación.

Por sótano se vaciaban cuatro losas postensadas, y al ser cuatro sótanos se tendría en total dieciséis sectores que estudiar. Sin embargo, debido a la llegada e implementación del equipo sólo fueron doce los sectores estudiados.

Una losa postensada puede ser tensada cuando el concreto alcanza una mínima resistencia a la compresión, en este proyecto ese valor era de 250 kg/cm².

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestra la secuencia realizada para obtener la medición de la madurez en las losas, las termocuplas son activadas inmediatamente después de realizar el vaciado de la losa, teniendo en cuenta eso se decidió por evaluar la resistencia a la compresión a la edad de 3, 7 y 28 días tal y como se aprecia en la tabla 5.5.

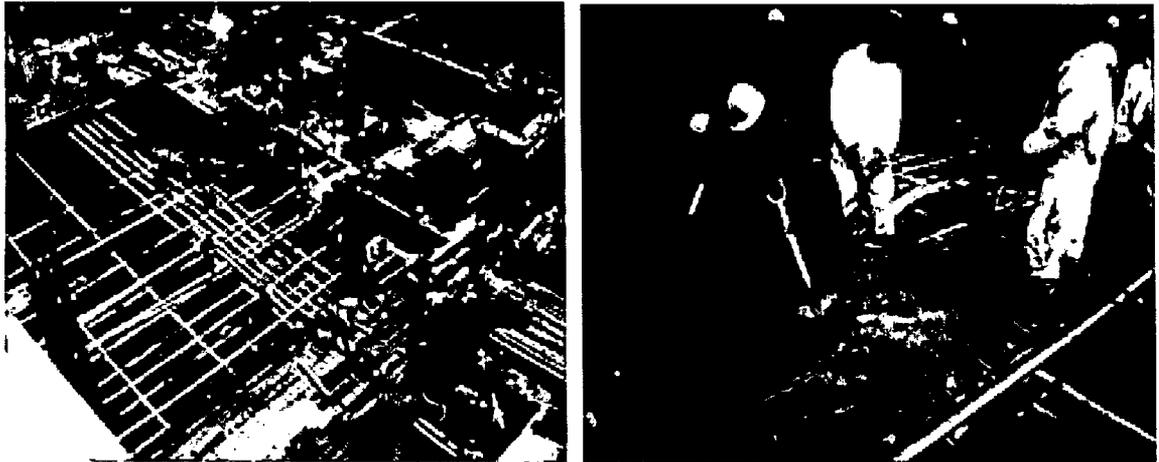


Figura 5.7: Vaciado de la primera losa postensada.



Figura 5.8: Evaluación de la resistencia de una losa postensada.

Tabla 5.5: Resultados de la implementación del método de madurez en losas postensadas

Edad (días)	Madurez (°C-hr)	f'c estimada (kg/cm²)	f'c probetas (kg/cm²)	Diferencia (kg/cm²)	Error (%)
3	1468	227	263	36	14
3	1564	230	196	-34	-18
3	1556	230	206	-24	-12
3	1526	229	211	-18	-8
3	1523	229	262	33	13
3	1550	230	216	-14	-6
3	1486	227	223	-4	-2
3	1494	228	210	-18	-8

3	1447	226	212	-14	-7
3	1542	230	211	-19	-9
3	1353	222	205	-17	-8
3	1375	223	205	-18	-9
7	5319	300	274	-26	-9
7	5319	300	283	-17	-6
7	5089	297	294	-3	-1
7	4912	295	289	-6	-2
7	4999	296	294	-2	-1
7	5423	301	266	-35	-13
7	4674	292	271	-21	-8
7	4749	293	258	-35	-14
7	3566	277	276	-1	0
7	5080	297	259	-38	-15
7	4674	292	251	-41	-16
7	4749	293	259	-34	-13
28	13627	353	361	8	2
28	16321	363	363	0	0
28	16819	365	368	3	1
28	16437	363	369	5	1
28	16495	364	364	1	0
28	15288	359	361	1	0
28	16379	363	365	1	0
28	14730	357	363	6	2
28	15234	359	363	4	1
28	15726	361	365	4	1
28	15979	362	368	6	2

Fuente: Propia.

De la anterior tabla, " f_c estimada" hace referencia a la resistencia estimada por medio del método de madurez mientras que " f_c probetas" es la resistencia proporcionada por el método descrito en la ASTM C39.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se verá el análisis de los resultados obtenidos por los diversos métodos estandarizados. Primeramente, se empezará viendo el análisis de resultados generados en el laboratorio. En este análisis, se resolverá inquietudes como las siguientes: ¿Qué tan preciso es el método de madurez?, ¿Cuál tiene mayor precisión el modelo de Nurse – Saúl o el modelo de Arrhenius?, ¿De los cuatro métodos estandarizados (madurez, número de rebote, velocidad de pulso y probetas cilíndricas) cual genera mejores resultados?, entre otras preguntas.

Por supuesto las anteriores inquietudes están relacionadas con los objetivos propuestos en esta investigación; para el análisis a nivel de laboratorio se realizará la comparación entre el método de madurez y el método de probetas cilíndricas para conocer las ventajas y desventajas de la implementación del método de madurez.

6.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

Para poder determinar la precisión de un método, se tiene que recurrir a un análisis estadístico. Existen una gran cantidad de variables estadísticas que ayudan a determinar lo anterior, sin embargo en esta investigación solo se tomará en cuenta dos variables: la desviación estándar y el coeficiente de correlación.

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de un grupo de datos con respecto al promedio, también puede ser interpretada como una medida de incertidumbre y por tal razón es que es utilizada para determinar la precisión de un método. Para poder determinar este parámetro se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ : desviación estándar o desviación típica.

n: número de datos.

x_i : valores de los datos desde $i= 1$ hasta $i= n$.

\bar{x} : promedio del conjuntos de datos x_i .

El coeficiente de correlación lineal o de Pearson es una medida utilizada para saber si existe o no una relación lineal entre dos variables aleatorias, también puede decirse que es utilizada para medir el grado de relación entre dos variables cuantitativas. Debido a esto es que se decidió utilizarse como complemento de la desviación estándar, la siguiente formula nos permite determinar el coeficiente de correlación:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Donde:

r_{xy} : coeficiente de correlación entre las variables x e y .

n : número de datos.

x_i : conjunto de valores para la variable x .

y_i : conjunto de valores para la variable y .

Para obtener mejores resultados es preferible tener más de treinta ensayos, aunque de acuerdo con la ACI 214 R-02 también es aceptable tener entre quince a treinta ensayos. En nuestro caso se tienen en total veintiséis datos, sin embargo más adelante se verá que dos de ellos serán eliminados ya que producen mucha variación al resto de la data.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el primer punto por ver es la precisión del método de madurez.

6.1.1. Precisión del método de madurez

6.1.1.1 Precisión para el modelo de Nurse - Saúl

Para poder calcular la precisión se tomará los resultados de las probetas cilíndricas como base patrón. Además teniendo en cuenta la tabla 4.15 del capítulo 4, se tiene la tabla 6.1:

Tabla 6.1: Data utilizada para el modelo de Nurse - Saul

Edad (días) 1	R. Probetas (kg/cm²) 2	R. Madurez (kg/cm²) 3	Error (%) 4
1	60	73	-22
1	54	72	-33
2	119	109	8
3	133	137	-3
3	132	139	-5
3	135	134	1
3	135	134	1
4	172	153	11
6	191	183	4
6	186	183	2
7	182	190	-4
7	196	190	3
8	227	200	12
8	235	199	15
8	214	199	7
8	214	200	7
14	251	235	6
14	259	235	9
21	263	262	0
21	249	262	-5
22	275	265	4
27	267	278	-4
27	279	278	0
28	289	280	3
28	301	280	7
28	302	280	7

Fuente: Propia.

De la tabla 6.1, se puede notar que en total son veintiseis datos y además que los dos primeros datos presentan una mayor desviación con respecto a los otros. Entonces cabe preguntarse la razón por lo cual se ha producido esto, lo que se encontró fue que la madurez registrada para las resistencias de 73 y 72 kg/cm² fueron de 512 y 505 °C-hr respectivamente.

Y si se tiene en cuenta la curva madurez – resistencia para el modelo de Nurse – Saúl, de acuerdo a la tabla 4.12 del capítulo 4, se observa que el primer punto de la curva empieza con un valor de madurez igual a 618 °C – hr.

Con lo cual se aprecia que los valores de 512 y 505 son menores a 618, es decir como una futura recomendación, se debe ensayar lo más antes posible siempre y cuando el concreto tenga la suficiente rigidez de resistir cargas a compresión para evitar este tipo de errores. En nuestro caso pudo haberse hecho antes de 1 día debido a la presencia del aditivo Sika 3. Es por esa razón que en adelante para el análisis no se tomará en cuenta esos dos resultados.

Con los valores de la columna 4 presentados en la tabla 6.1 se puede obtener la desviación estándar de la data, mientras que con los valores de la columna 2 y 3 de la misma tabla se puede calcular el coeficiente de correlación de ambas variables. Aplicando este criterio y las fórmulas descritas anteriormente se obtiene una desviación estándar igual a 5.4% y un coeficiente de correlación de 0.977. Gráficamente esto se puede apreciar en la figura 6.1.

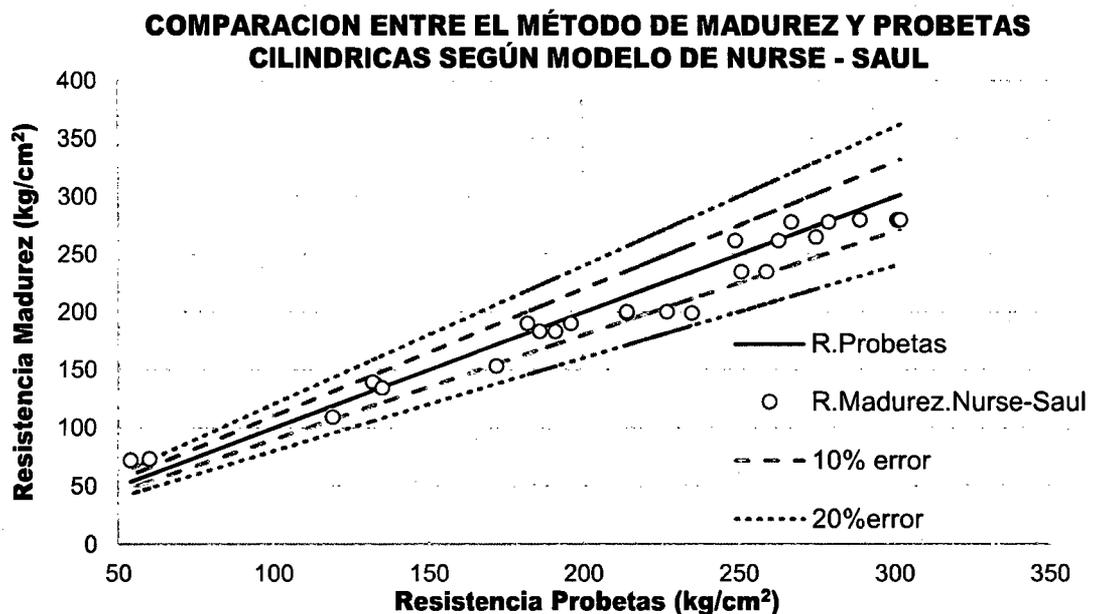


Figura 6.1: Comparación de las resistencias estimadas por el modelo de Nurse – Saúl.

Se puede notar claramente de la anterior grafica que existe una fuerte relación entre la resistencia estimada por el método de madurez y la resistencia obtenida por el método de probetas cilíndricas, esto mismo se puede verificar con los valores de la desviación estándar y coeficiente de correlación calculados.

6.1.1.2 Precisión para el modelo de Arrhenius

La determinación de la precisión para este modelo será similar al que se hizo para el modelo de Nurse – Saúl. En este caso, se utilizará la tabla 4.16 del capítulo 4, obteniéndose la tabla 6.2:

Tabla 6.2: Data utilizada para el modelo de Arrhenius

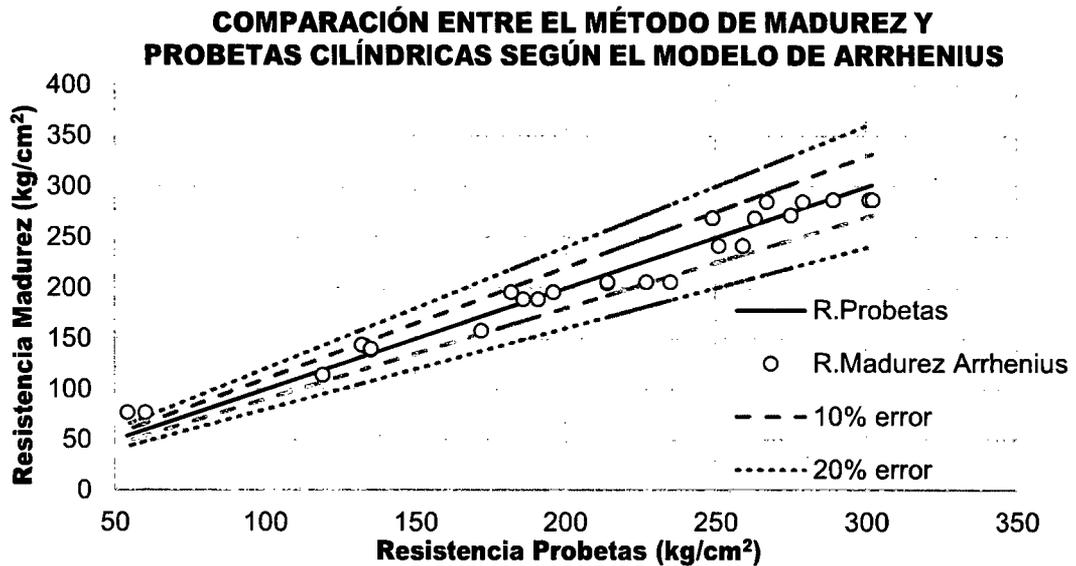
Edad (días)	R. Probetas (kg/cm²)	R. Madurez (kg/cm²)	Error (%)
1	60	77	-28
1	54	77	-43
2	119	114	4
3	133	143	-8
3	132	144	-9
3	135	139	-3
3	135	140	-4
4	172	158	8
6	191	189	1
6	186	189	-2
7	182	196	-8
7	196	196	0
8	227	206	9
8	235	206	12
8	214	205	4
8	214	206	4
14	251	242	4
14	259	242	7
21	263	269	-2
21	249	269	-8
22	275	272	1
27	267	285	-7
27	279	285	-2
28	289	287	1

28	301	287	5
28	302	287	5

Fuente: Propia.

A igual manera que la tabla 6.1, nótese una mayor desviación por parte de los dos primeros datos. Sin embargo, como se dijo anteriormente estos no serán tomados en cuenta para el análisis.

Aplicando el mismo criterio utilizado para el modelo anterior, se obtiene una desviación estándar igual a 5.8% y un coeficiente de correlación de 0.977. La figura 6.2 muestra la comparación de ambos métodos.



Se puede apreciar que el modelo de Arrhenius también otorga una buena correlación con el método de probetas cilíndricas. A diferencia del modelo de Nurse – Saúl, este último posee una menor desviación estándar de los datos, por tal razón, en adelante cuando se haga mención sobre el método de madurez se estará refiriendo al modelo de Nurse - Saúl.

6.1.2. Precisión del método del número de rebote

Con el fin de obtener la precisión del método del número de rebote para la data estudiada, se toma en consideración la tabla 4.18 del capítulo 4, y se obtiene la tabla 6.3:

Tabla 6.3: Data utilizada para el método del número de rebote.

Edad (días) 1	R. Probetas (kg/cm²) 2	R. Rebote (kg/cm²) 3	Error (%) 4
1	60	65	-8
1	54	80	-48
2	119	96	19
3	133	174	-31
3	132	190	-44
3	135	158	-17
3	135	174	-29
4	172	197	-15
6	186	189	-2
6	191	229	-20
7	182	236	-30
7	196	182	7
8	227	275	-21
8	235	236	0
8	214	259	-21
8	214	252	-18
14	251	260	-4
14	259	244	6
21	249	260	-4
21	263	268	-2
22	275	275	0
27	267	283	-6
27	279	283	-1
28	289	307	-6
28	301	221	27
28	302	244	19

Fuente: Propia.

A diferencia del método de madurez, nótese que las desviaciones de los datos, columna 4, son mucho mayores y además que no presenta una uniformidad en estos valores.

Lo mencionado anteriormente se puede apreciar de dos maneras, primeramente es que tiene un valor de la desviación estándar igual a 17.3% y un coeficiente de correlación igual a 0.808. La segunda forma de apreciar esto es por medio de la figura 6.3.

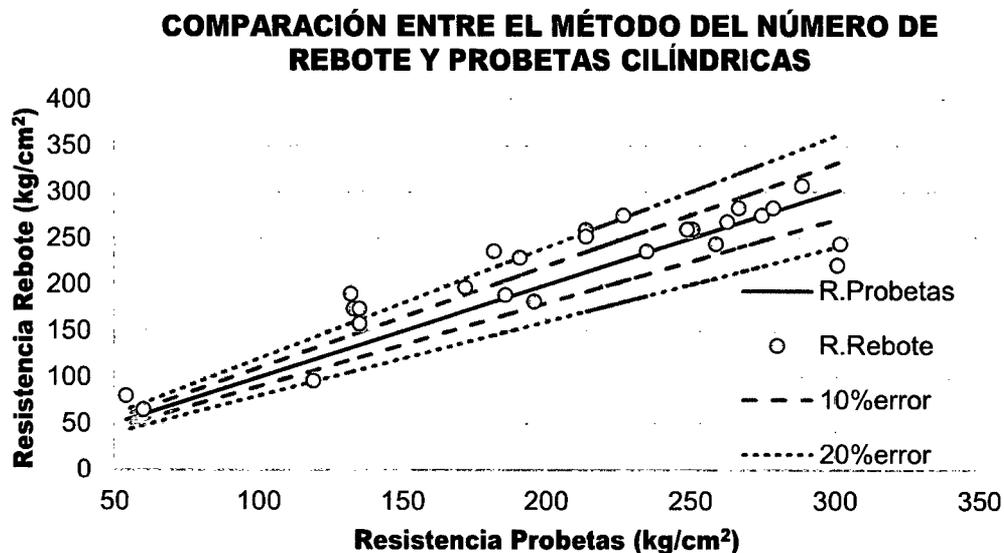


Figura 6.3: Comparación de las resistencia estimadas utilizando el método del número de rebote.

La razón por la cual el método del número de rebote otorgo estos resultados es debido a que este método, hoy en día se sabe, que es más utilizado para medir la uniformidad. Es decir este método está más dirigido a medir la rigidez del concreto que la resistencia a la compresión.

Otro punto es que este método mide en teoría la "resistencia a la compresión" pero de la zona en la cual impactará el martillo. Si en esta área se encontrará un vacío la resistencia sería menor, caso contrario a que se encuentre un agregado grueso grande, lo cual generaría una mayor resistencia por ende.

Un punto más a acotar es que a pesar de que la curva rebote vs resistencia a la compresión posea un coeficiente de correlación de 0.975 no genera estimaciones

apropiadas de la resistencia. Esto puede ser debido a que la evolución de la resistencia a la compresión del concreto estudiado no sigue una función lineal, pese a que el número de rebote si lo haga, suposición que se hizo en base a otras investigaciones ya que la norma de este método no dice nada al respecto de ese punto.

6.1.3. Precisión del método de la velocidad de pulso

Para el caso de la velocidad de pulso, al igual que los otros métodos, se usa parte de la data de la tabla 4.20 del capítulo 4, obteniéndose la tabla 6.4

Tabla 6.4: Data utilizada para el método de la velocidad de pulso

Edad (días) 1	R. Probetas (kg/cm²) 2	R. Ultrasonido (kg/cm²) 3	Error (%) 4
1	60	92	-53
1	54	106	-96
2	119	117	2
3	133	105	21
3	132	128	3
3	135	150	-11
3	135	149	-10
4	172	161	6
6	191	266	-39
6	186	209	-12
7	182	170	7
7	196	153	22
8	227	226	0
8	235	168	29
8	214	201	6
8	214	211	1
14	251	202	20
14	259	222	14
21	249	180	28
21	263	187	29
22	275	224	19
27	267	195	27
27	279	246	12
28	289	205	29

28	301	253	16
28	302	246	19

Fuente: Propia

De la columna 4 se puede apreciar que las desviaciones son muy grandes, pero si presenta una “uniformidad” en los datos a partir de los 14 días. Se puede decir que a partir de esta edad la resistencia estimada por parte del método de velocidad de pulso siempre es menor a la de compresión.

Utilizando el mismo criterio para los anteriores métodos se tiene que la desviación estándar es igual a 16.1% y un coeficiente de correlación igual a 0.773. La manera gráfica de representar estos datos puede observarse en la figura 6.4.

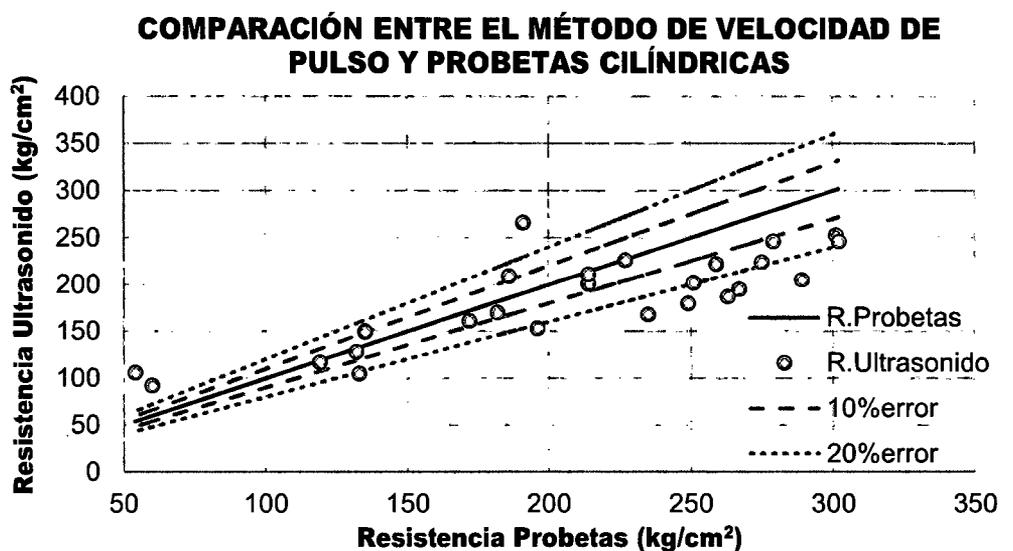


Figura 6.4: Comparación de las resistencias estimadas utilizando el método de velocidad de pulso

De nuevo, al igual que el método anterior, cabe preguntarse la razón de estos resultados. Un primer punto a mencionar es que actualmente se sabe que no existe una correlación entre la velocidad de pulso y la resistencia. Es más, la misma norma de este método nos sugiere no utilizarlo para ese fin.

Otro punto es que al momento de realizar mediciones para la velocidad de pulso, las lecturas son muy inestables lo cual genera errores a futuro en la estimación de la

resistencia. Particularmente, lo mencionado es una desventaja del uso del equipo de ultrasonido.

Un punto más a añadir es que la “uniformidad” hablada anteriormente es debido a la forma típica de la gráfica velocidad de pulso vs resistencia a la compresión. Para edades tempranas un cambio pequeño de la velocidad de pulso genera un cambio grande en la resistencia, mientras que para edades posteriores un cambio pequeño de la velocidad genera un cambio pequeño en la resistencia. Sin embargo, pese a conocer esto la norma no indica que tipo de función utilizar para esta curva.

Un resumen de todo lo anterior mencionado es la tabla 6.5, en dónde se observa dos puntos: el método de madurez genera mejores estimaciones de la resistencia a la compresión comparado con los otros métodos y el otro punto es que a pesar de que el método de velocidad de pulso tenga una menor desviación estándar que el método del número de rebote, sería el menos aceptable de estimar la resistencia debido al coeficiente de correlación que posee.

Tabla 6.5: Resumen de los ensayos no destructivos para la estimación de la resistencia a la compresión.

Métodos	Coefficiente de Correlación	Desviación Estándar (%)
Madurez (Nurse - Saúl)	0.977	5.4
Madurez (Arrhenius)	0.977	5.8
Rebote	0.808	17.3
Ultrasonido	0.773	16.1

Fuente: Propia.

Gráficamente la tabla 6.5 puede apreciarse en la figura 6.5

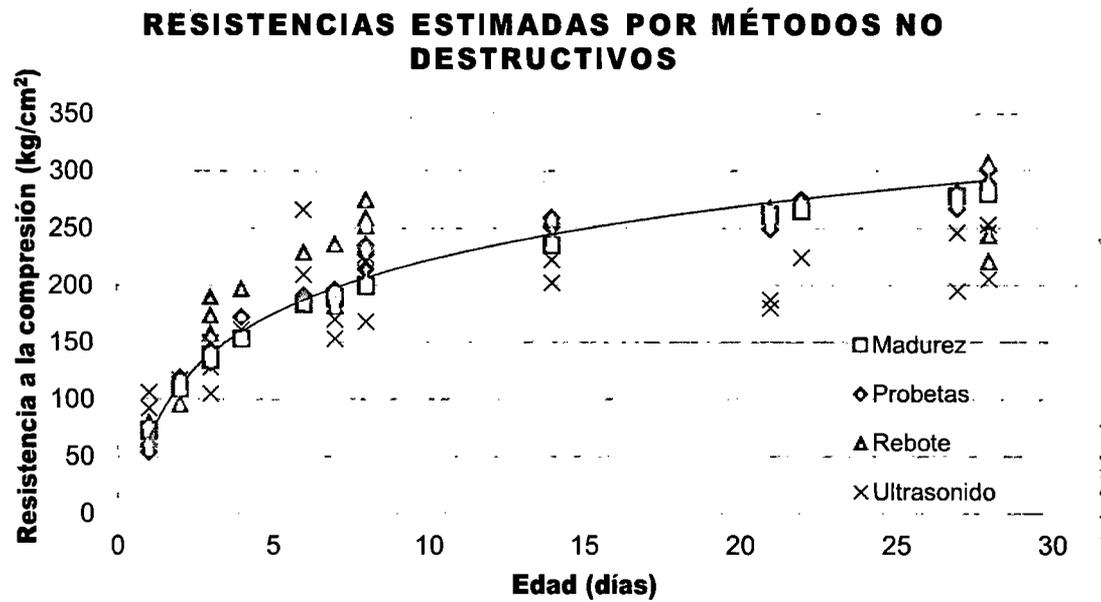


Figura 6.5: Comparación de los ensayos no destructivos utilizados con respecto al método de probetas cilíndricas.

6.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO

Siguiendo el orden de acuerdo con el que fue implementado el método de madurez, primeramente se analizará los resultados en un muro anclado y posteriormente en las losas postensadas.

6.2.1. Análisis del muro anclado en el proyecto implementado

Este muro anclado estaba diseñado para una resistencia de 350 kg/cm^2 , y para poder realizar su desencofrado se requería conocer cuando alcanzaba la resistencia de 210 kg/cm^2 .

El método tradicional para poder conocer la evolución de la resistencia es de las probetas cilíndricas, sin embargo en este proyecto también se decidió por implementar el método de madurez para realizar este fin. La tabla 6.6 muestra los resultados proporcionados por ambos métodos, esta tabla se generó gracias a la ayuda de las tablas 5.3 y 5.4 del capítulo 5 de la presente investigación.

Tabla 6.6: Comparación de los resultados de resistencias en el muro anclado.

Edad (días)	R. Madurez (kg/cm²)	R. Probetas (kg/cm²)	Error (%)
1	136	135	0.7
2	208	196	6.1
3	227	209	8.6
5	232	223	4.0
7	264	241	9.5
14	340	331	2.7
28	372	368	1.1

Fuente: Propia.

De la tabla anterior, nótese que los resultados generados por madurez indican que la resistencia a la compresión del muro anclado se está desarrollando a mayor medida en comparación de la resistencia por las probetas cilíndricas.

La diferencia de la evolución de la resistencia se debe a varios factores, los principales serían primeramente el medio ambiente. La construcción de este muro fue realizada en el mes de enero donde las temperaturas podrían llegar hasta un pico de 30°C, al haber más calor en el medio es natural que el concreto también tenga más energía y por ende que la resistencia evolucioné más rápido que comparado a las condiciones de laboratorio.

Otro factor es la forma geométrica, el muro anclado tiene una mayor área expuesta al calor que una probeta cilíndrica. Un factor más es el tema del curado, las probetas cilíndricas fueron curadas en pozas mientras que el curado del muro fue realizado con un curador químico.

Sin embargo, el hecho que la resistencia proporcionada por el método de madurez sea mayor al proporcionado de las probetas cilíndricas no necesariamente indica que se tiene buenos resultados. De acuerdo a la norma ASTM C 1074, punto 3.4.2.5 del capítulo 3 de la presente investigación, nos indica que *“si la diferencia entre el valor otorgado por el método de madurez y el de las probetas cilíndricas es consistente y supera el 10%, una nueva curva deberá ser desarrollada”*.

Para poder corroborar lo anterior, véase la figura 6.6. En ella se puede notar tres importantes puntos. En primer lugar es que las resistencias estimadas por madurez están dentro del rango $\pm 10\%$, en segundo punto y debido a lo anterior es que la curva generada no necesita ser calibrada nuevamente y puede ser utilizada para otros ensayos.

Y finalmente es que la resistencia de 210 kg/cm^2 es alcanzada aproximadamente a los 3 días por el método de probetas cilíndricas mientras que por el método de madurez esto mismo se logra a la edad de 2 días y medio.

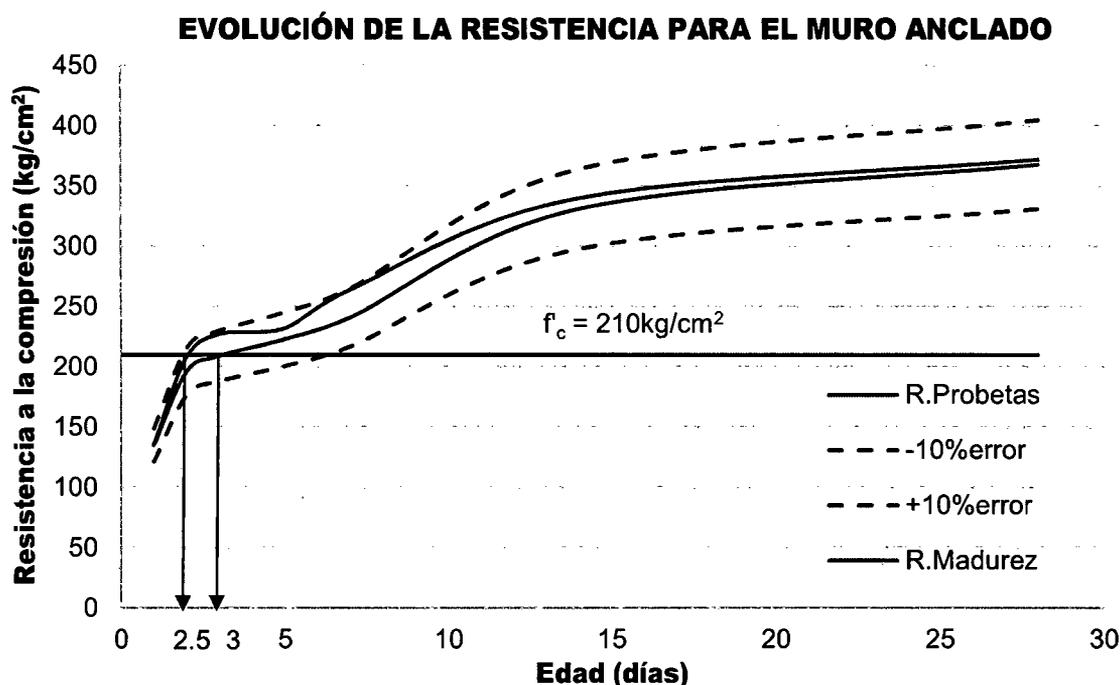


Figura 6.6: Desarrollo de la resistencia según el método de madurez y el de probetas cilíndricas en un muro anclado.

6.2.2. Análisis de las losas postensadas en el proyecto implementado

Para el caso de las losas postensadas, que también estaban diseñadas para un concreto de 350 kg/cm^2 , lo primordial era saber cuándo estarían listas para ser tensadas. Para eso, deberían alcanzar una resistencia mínima igual a 250 kg/cm^2 , sin

embargo, este valor fue cambiado a 230 kg/cm², a continuación se verá la razón del caso.

En la tabla 6.7 se muestra los datos para la edad de 3 días, esta tabla se obtuvo de la toma de datos de la tabla 5.5 del capítulo 5.

Tabla 6.7: Comparación de los resultados de resistencia para la edad de 3 días

Edad (días)	R. Madurez (kg/cm ²)	R. Probetas (kg/cm ²)	Error (%)
3	227	263	14
3	230	196	-18
3	230	206	-12
3	229	211	-8
3	229	262	13
3	230	216	-6
3	227	223	-2
3	228	210	-8
3	226	212	-7
3	230	211	-9
3	222	205	-8
3	223	205	-9

Fuente: Propia.

Si se analiza el primer valor medido, se puede ver que este no cumple con lo mencionado en la ASTM C 1074, es decir que la desviación debe ser hasta un $\pm 10\%$. Daría paso a pensar que se debe hacer un reajuste a la curva, sin embargo hay que ver las posibles razones por lo cual se produjo eso.

El valor de 263 kg/cm² representa aproximadamente el 75% de la resistencia de diseño 350 kg/cm². Si se pone este dato en la figura 6.7, desarrollo relativo de las resistencias proporcionados por la diseñadora del concreto, se tiene que este resultado no está dentro de los rangos dados en esta curva. Lo cual indica que ha ocurrido un error en esta probeta. Rastrear este error no es algo fácil, ya que pudo provenir de su elaboración, curado o incluso su ensayo. Lo que se hizo fue esperar el siguiente resultado para la otra losa postensada.

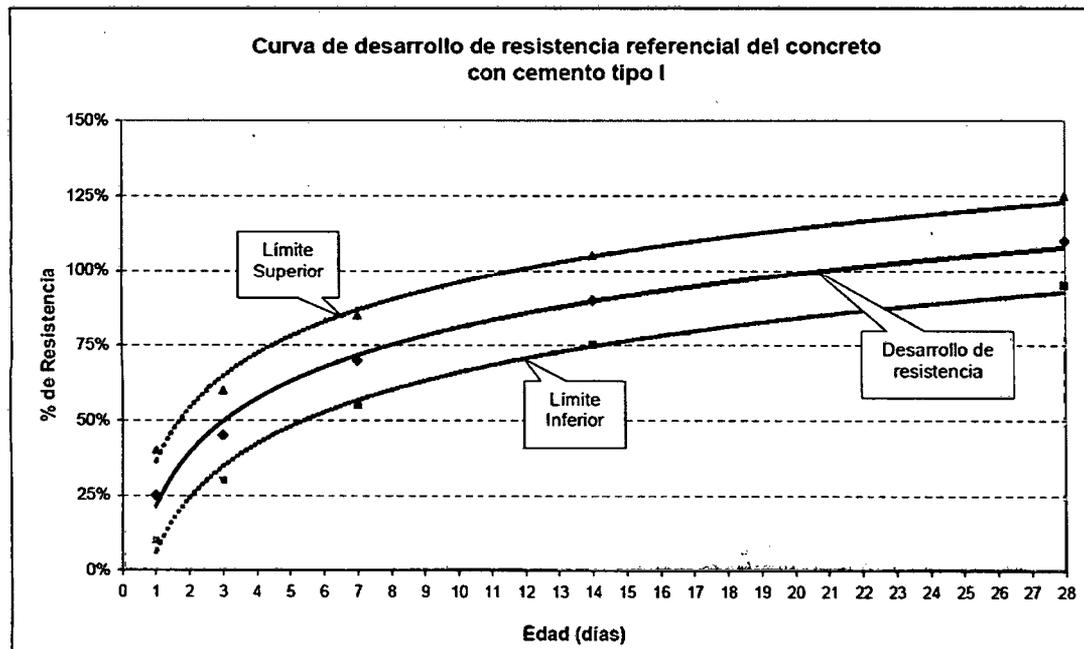


Figura 6.7: Desarrollo relativo para las resistencias del concreto utilizado en el proyecto.

El siguiente resultado tuvo como valor igual a 196 kg/cm^2 , que representa el 56 % de la resistencia de diseño. Pesé a que este resultado si está dentro del rango de la figura 6.7, este generó una inquietud entre los ingenieros del área de calidad.

Como se vio el primer resultado superaba los 250 kg/cm^2 y permitía tensar, sin embargo el siguiente resultado no lo permitía e incluso daba un valor mucho menor al primero.

Debido a eso, se decidió por preguntar al ingeniero estructural responsable del diseño de las losas, el cual menciono que era posible tensar a una resistencia mínima de 230 kg/cm^2 .

Si se ve el tercer resultado, tenemos un valor más razonable comparado con los otros dos y además se pudo ver que las mediciones otorgadas por el método de madurez eran prácticamente las mismas, es decir una resistencia de 230 kg/cm^2 . Y más aún que este valor si permitía realizar el tensado, es a partir de este valor que se comenzó a utilizar más la resistencia estimada por madurez como un indicador para realizar esta actividad.

Los demás resultados de la tabla 6.7 muestran que lo dicho anteriormente es correcto, que la resistencia estimada por madurez tiene un comportamiento estable mientras que la resistencia otorgada por el método de probetas cilíndricas tiene mucha dispersión, esto se puede apreciar en la figura 6.8.

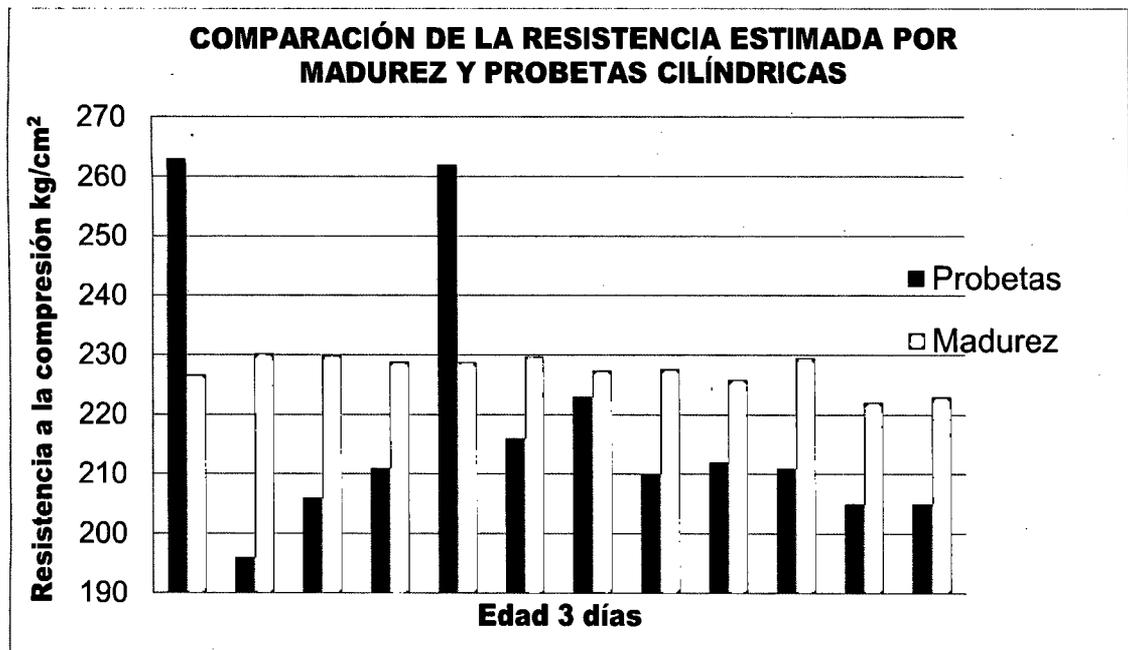


Figura 6.8: Comparación de las resistencias a la edad de 3 días.

Actualmente se sabe que es normal esta dispersión generada por el método de probetas cilíndricas en edades tempranas ya que en la mayoría de casos aún no se han completado las reacciones internas del concreto, esto mismo se notará para la edad de 7 días. Sin embargo, como ventaja del método de madurez, se puede ver que las estimaciones proporcionadas por este método generan una menor dispersión.

Teniendo las losas tensadas, se decidió hacerles un monitoreo a la edad de 7 días y 28 días por ambos métodos. Para empezar, se verá los resultados generados para la edad de 7 días.

Tabla 6.8: Comparación de los resultados de resistencia para la edad de 7 días

Edad (días)	R. Madurez (kg/cm ²)	R. Probetas (kg/cm ²)	Error (%)
7	300	274	-9
7	300	283	-6
7	297	294	-1

7	295	289	-2
7	296	294	-1
7	301	266	-13
7	292	271	-8
7	293	258	-14
7	277	276	0
7	297	259	-15
7	292	251	-16
7	293	259	-13

Fuente: Propia.

La tabla 6.8 muestra los resultados para la edad de 7 días, la fuente de estos valores es la misma que en el caso de la tabla 6.7, nótese que los resultados para los primeros valores cumplen con el rango del $\pm 10\%$

Pero los demás datos comienzan a salirse de este rango, la razón de esto es debido a la dispersión que se espera para edades tempranas. En cambio en las lecturas de madurez se tiene una menor dispersión entre ellos como se ve en la figura 6.9.

Un punto importante a mencionar es que a esta edad se puede notar que la resistencia estimada por madurez es mayor a la entregada por probetas, la posible razón de esto es debido a que la losa se encuentra en diferentes condiciones a la probeta. Esta tiene una mayor superficie expuesta al calor del medio ambiente y por ende genera con mayor rapidez reacciones internas, las cuales se ven reflejadas en el valor de la resistencia del concreto.

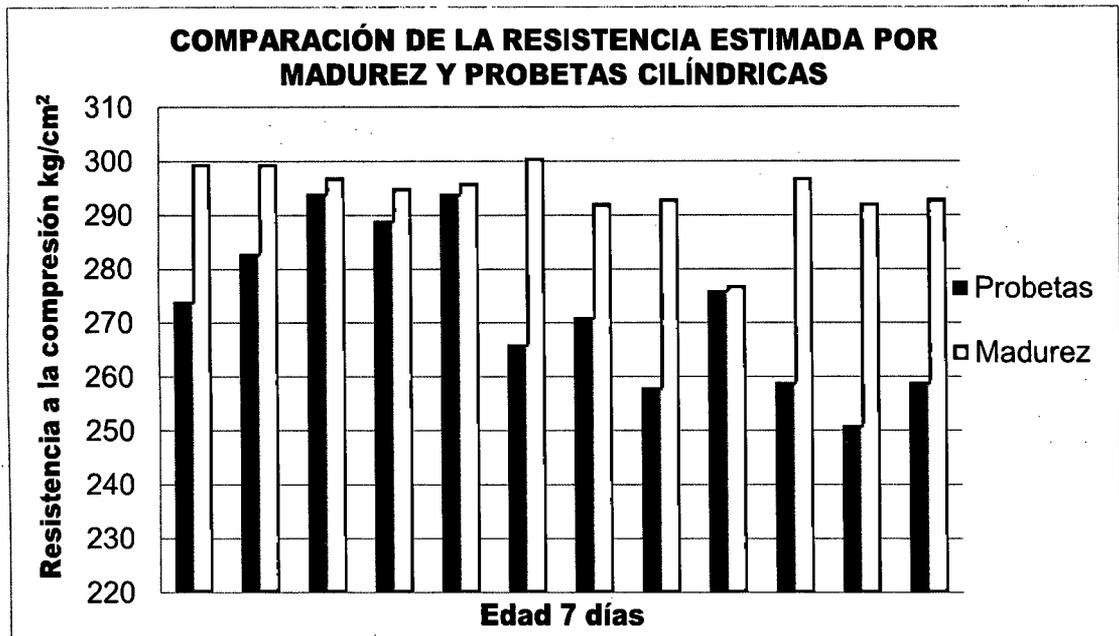


Figura 6.9: Comparación de las resistencias a la edad de 7 días.

Análogamente para la edad de 28 días, se tiene la tabla 6.9:

Tabla 6.9: Comparación de los resultados de resistencia para la edad de 28 días

Edad (días)	R. Madurez (kg/cm ²)	R. Probetas (kg/cm ²)	Error (%)
28	353	361	2
28	363	363	0
28	365	368	1
28	363	369	1
28	364	364	0
28	359	361	0
28	363	365	0
28	357	363	2
28	359	363	1
28	361	365	1
28	362	368	2

Fuente: Propia

De la anterior tabla hay que hacer hincapié a dos puntos, el primero es que las desviaciones generadas todas se encuentran dentro del rango de $\pm 10\%$. Las dispersiones para el método de las probetas cilíndricas han disminuido notablemente.

El segundo punto es que las resistencias estimadas por madurez ahora son menor al de las probetas, caso contrario a la edad de 7 días, véase figura 6.10. La razón probable de esto se debe al tema del curado de los elementos, las probetas al estar en laboratorio son curadas hasta la edad de 28 días mientras que las losas sólo han sido curadas hasta la edad de 7 días. Se cura hasta los 7 días ya que de acuerdo a otros estudios, se espera que el concreto alcance la resistencia especificada o de diseño, en la figura 6.10 se verificar esto, todas las resistencias estimadas son mayores a 350 kg/cm².

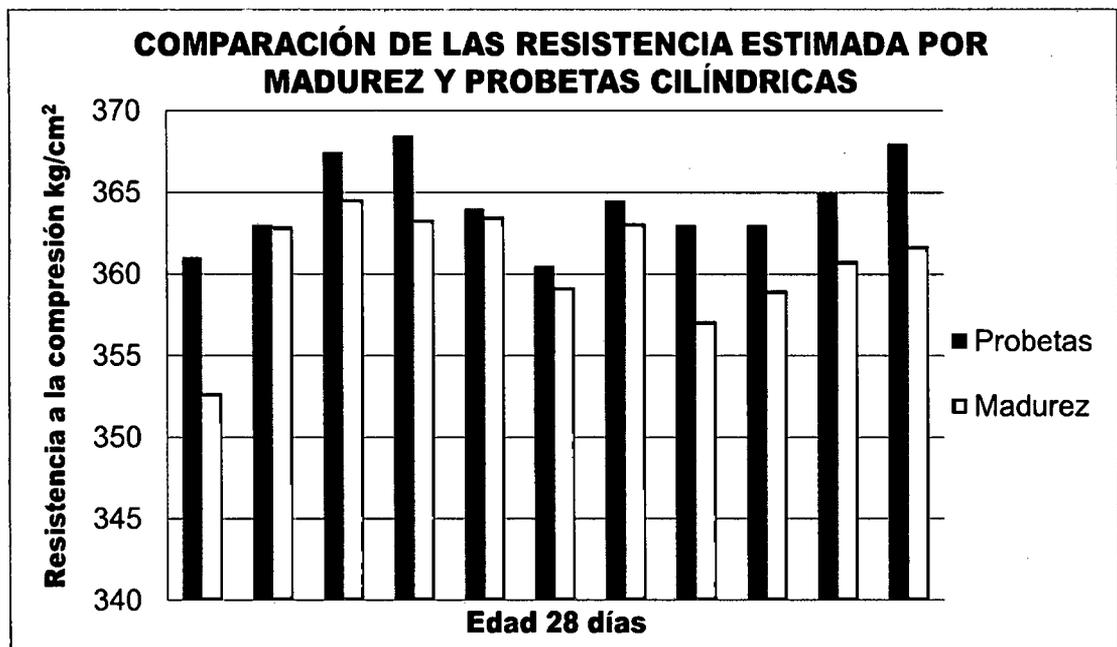


Figura 6.10: Comparación de las resistencias a la edad de 28 días.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- ✓ Tras realizar un análisis comparativo entre los métodos descritos en la ASTM C 39 - NTP 339.034, "Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas", ASTM C 1074 - NTP 339.217, "Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez", ASTM C 805 - NTP 339.181, "Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido (esclerometría)" y ASTM C 597 - NTP 339.237, "Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto", se pudo apreciar que el método de madurez era el que otorgaba estimaciones más apropiadas para edades menores a 28 días.
- ✓ La principal razón por la cual el método de madurez produce mejores estimaciones es debido a que este toma como fundamento que la resistencia a la compresión se debe principalmente al calor generado de las reacciones internas entre el cemento y el agua.
- ✓ En comparación entre los modelos utilizados para calcular la madurez, de la tabla 6.5 del capítulo VI, se vio que el modelo de Nurse – Saúl produjo una desviación estándar igual a 5.4 % y un coeficiente de correlación de 0.977 mientras que el modelo de Arrhenius generó una desviación estándar igual a 5.8 % y un coeficiente de correlación igual a 0.977, lo cual indica que ambos modelos son apropiados para poder estimar la resistencia a la compresión.
- ✓ Los perfiles térmicos desarrollados poseen un comportamiento típico, alcanzan su valor máximo durante las primeras veinticuatro horas mientras que para el resto de días prácticamente es constante e igual a la temperatura del medio ambiente.

- ✓ Para el diseño de mezcla estudiado en laboratorio, se vio que los modelos de Nurse – Saúl y Arrhenius producen estimaciones apropiadas de la resistencia a la compresión. Sin embargo, de acuerdo a investigaciones internacionales mencionan que ambos modelos son apropiados para temperaturas externas dentro del rango de 5°C y 35°C.
- ✓ Debido a las desviaciones estándares y coeficientes de correlación producidos por el método del número de rebote y velocidad de pulso, ambos métodos no serían los más apropiados para monitorear el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto durante los primeros 28 días.
- ✓ En cuanto a la implementación del método de madurez en elementos como muros anclados y losas postensadas, se observó que este método otorga resultados similares a los entregados en proyectos extranjeros, es decir la optimización del tiempo en actividades constructivas.
- ✓ Actualmente se sabe que los resultados proporcionados por la ASTM C 39 – NTP 339.034, *"Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas"*, generan una dispersión grande para edades tempranas, sin embargo si se utiliza el método de madurez para estas edades, estas dispersiones son menores que las proporcionadas por la ASTM C 39 – NTP 339.034.
- ✓ Para poder usar el método de madurez es necesario llevar a cabo la elaboración de la curva madurez – resistencia, la cual necesariamente requiere el uso del método de probetas cilíndricas. Con esto se pretende indicar que el método de madurez no tiene como objetivo reemplazar al método de probetas cilíndricas.

7.2. RECOMENDACIONES

- Para el ensayo realizado, se pudo notar que no fue necesario calcular el valor exacto de la temperatura datum o energía de activación, como sugerencia se podría adoptar un valor de acuerdo al lugar del trabajo que se encuentre. Sin embargo, si se requiere conocer el valor exacto de esta variable, véase anexo A1 de la ASTM C 1074, "*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.*"
- En cuanto a la generación del perfil térmico del concreto, se recomienda que se tome intervalos menores al sugerido por la norma ASTM C1074, principalmente a las primeras 24 horas. Ya que es ahí donde se genera un mayor gradiente de temperatura.
- Con el fin de obtener resultados apropiados usando el método de madurez, es necesario que se asegure el curado de los elementos, sean probetas, muros, losas, etc.
- Si se requiere llevar a cabo la implementación del método de madurez en un proyecto, es necesario que se implemente desde que el proyecto comienza. Ya que, como desventaja del método, no puede ser utilizado en proyectos existentes.
- Al realizar la implementación del método de madurez, es necesario tomar medidas preventivas en el proyecto con el fin de evitar problemas tales como ruptura de las termocuplas, obstrucción de estos, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abrams Duff, Design of Concrete Mixtures, Forgotten Books, London, England, 2013
2. Aguilar Beltrán Oscar, Rodríguez Mejía Edwin y Sermeño Monge Martín, "Determinación de la resistencia del concreto a edades tempranas bajo la norma ASTM C 1074, en viviendas de concreto coladas en sitio", Tesis Universidad de el Salvador – Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2009.
3. Alabama Department of Transportation, Evaluation of the maturity method to estimate concrete strength, ADT, USA, 2006.
4. American Concrete Institute, ACI 211.1: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI, USA, 2003.
5. American Concrete Institute, ACI 228.1R-03: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength, ACI, USA, 2003.
6. American Society for Testing and Materials, ASTM C 192/C 192M: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM, USA, 2009.
7. American Society for Testing and Materials, ASTM C 39/ C 39 M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM, USA, 2009.
8. American Society for Testing and Materials, ASTM C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM, USA, 1997
9. American Society for Testing and Materials, ASTM C 805: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM, USA, 1997.

10. American Society for Testing and Materials, ASTM C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM, USA, 2011.
11. Covarrubias Juan Pablo, Madurez del concreto y desmolde, Litoral Ingeniería, Chile, 2011.
12. Hermida Germán, Método de madurez y tecnología DSTA - AIDETERM, Sika, Lima, 2008.
13. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, NTP 339.033: Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en campo, INEI, Lima, 2009.
14. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, NTP 339.034: Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en muestras cilíndricas, INEI, Lima, 2009.
15. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, NTP 339.181: Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido, INEI, Lima, 2009.
16. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, NTP 339.217: Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez, INEI, Lima, 2007.
17. Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, NTP 339.237: Método de ensayo para determinar la velocidad de pulso a través del concreto, INEI, Lima, 2009.
18. Ningxu Han, Maturity Method, RILEM TC 185 – ATC, USA, 2005.

19. Oluokon Francis, Burdette Edwin, and Deatherage Harold, Early – Age Concrete Strength Prediction by Maturity – Another Look, ACI, USA, 1990
20. Pearsons Thomas, Early Concrete Strength Determination by Maturity, ACI, USA, 1995.
21. Shariati Mahdi, Ramli-Sulong Hafizah, Arabnejad Mohammad, Shafigh Payam and Sinaei Hamid, Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests, University of Malaya, Malaysia, 2010.
22. Aydin Ferhat and Saribiyik Mehmet, Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings, Sakarya University, Turkey, 2010.

ANEXOS

ANEXO A: REGISTRO DE LA MADUREZ UTILIZANDO LAS TERMOCUPLAS TIPO K Y TERMOMETRO FLUKE

El siguiente anexo mostrará los pasos necesarios a realizar con el fin de hacer el registro de la madurez del concreto utilizando las termocuplas tipo K y termómetro Fluke como se aprecia en la figura A.1.

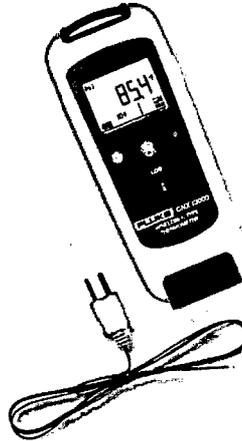


Figura A.1: Termocuplas tipo K y termómetro Fluke.

1. Verificar que el equipo se encuentre en buenas condiciones, principalmente calibrado. Y a su vez verificar que las termocuplas se encuentren operativas y en buen estado.
2. Insertar o embeber las termocuplas en el elemento de concreto bajo estudio, para el caso de una probeta cilíndrica este se coloca en el tercio central.
3. Una vez terminado el vaciado del elemento, conectar el termómetro a las termocuplas para poder empezar el registro de la temperatura, así como se ve en la figura A.2.



Figura A.2: Termómetro registrando la temperatura de una probeta.

4. En el caso del termómetro Fluke, se necesitará de una computadora ya que este puede registrar los datos de manera inalámbrica siempre y cuando se conecte el USB Fluke, véase figura A.3:

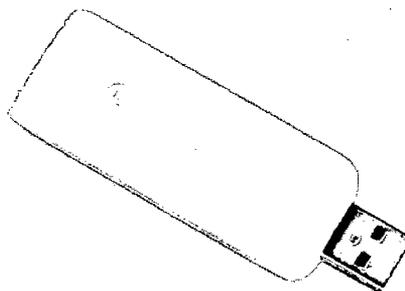


Figura A.3: USB Fluke

5. Una vez conectado el USB, será necesario hacer uso del software CNX SW 3000, programa que viene junto con el termómetro Fluke y USB Fluke. Al empezar el programa se hará click al botón "Discover Devices", véase figura A.4. Después de esto, se hará click en el dispositivo que salga en la pantalla ploma inferior.

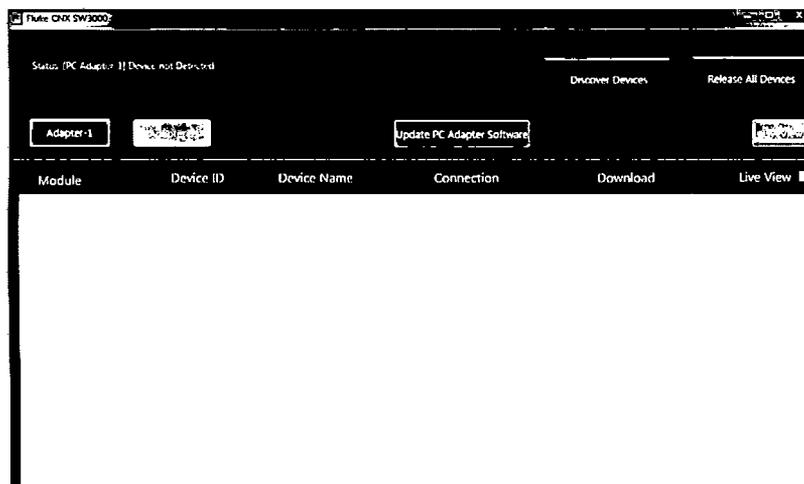


Figura A.4: Software CNX SW 3000.

6. Finalmente, saldrá una pantalla similar a la figura A.5. En ella se pondrá el periodo de estudio y así como el intervalo de cada cuanto se registrará la temperatura. Y automáticamente empezará el registro de datos hasta el periodo requerido.

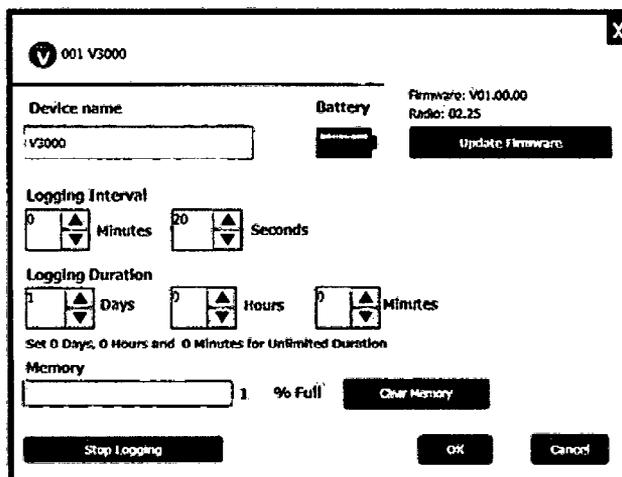


Figura A.5: Ingreso de datos al software CNX SW 3000.

Algunas recomendaciones para obtener un registro apropiado son que el USB Fluke esté conectado a la PC, lo cual implica que la PC este prendida durante el periodo de estudio. Al trabajar con El USB Fluke tener en cuenta que este funciona hasta una distancia de 20 metros.

ANEXO B: METODOLOGÍA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO DE MADUREZ

En el siguiente anexo se mostrará los pasos a seguir para poder aplicar el método de madurez, la mayoría de estos se encuentran basados de la norma ASTM C 1074, "*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*", investigaciones internacionales y experiencia propia.

Con el fin de poder utilizar el método de madurez es esencial que primero se desarrolle la curva "madurez vs. resistencia", cuyo procedimiento es el siguiente:

- Tomar una muestra de al menos 12 probetas de concreto.
- En una de las probetas colocar un sensor de temperatura al terminar su vaciado.
- El sensor debe ubicarse en el centro del concreto de la probeta.
- Inicializar el sensor una vez terminado la elaboración de la probeta.
- De acuerdo al modelo que se esté utilizando, elegir el valor de temperatura datum o energía de activación.
- Cuidar todas las probetas de igual forma.
- Ensayar 2 de las probetas sin sensor a las edades de 1,3 ,5 ,7 ,14 y 28 días.
- Medir la madurez en la probeta con sensor al momento de realizar el ensayo de las otras dos.
- Calcular el promedio de resistencia de las dos probetas ensayadas.
- Con los resultados obtenidos generar la curva "madurez vs. resistencia".

Luego de obtener la curva de madurez vs. resistencia, para poder estimar la resistencia a la compresión en base a su madurez, se tendrá que realizar los siguientes pasos:

- Insertar el sensor de temperatura en la probeta a ensayarse.
- Medir la madurez en la probeta con el sensor hasta la edad de ensayo.
- Ensayar la probeta en estudio para obtener el valor de la resistencia a la compresión.

- Con la madurez obtenida, ingresar su valor a la curva madurez vs. resistencia con el fin de obtener la resistencia estimada.

Un punto importante a mencionar es que la curva madurez vs. resistencia se debe mantener calibrada periódicamente realizando algunos ensayos de verificación de la curva, para lograr esto se sugiere el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra de 6 probetas cada 15 días.
- En una de las probetas colocar un sensor de madurez.
- Cuidar todas las probetas de igual forma.
- Ensayar dos probetas con madurez cercana a la que se utiliza a la edad de 1 o 2 días, dos probetas a los 7 días y las otras dos a los 28 días.
- Medir la madurez de las probetas a las edades de ensayo indicadas.
- Los puntos de madurez vs resistencia deben caer dentro de la tolerancia de $\pm 10\%$ con respecto a la curva original.
- Si los valores sobrepasan esta tolerancia de 10%, se deberá elaborar una nueva curva de madurez vs. resistencia.